

**Haifeng Xu**

**Hochpräzise Bestimmung der Form- und  
Orthogonalitätsabweichungen einer Spiegelecke  
und Untersuchung des Verhaltens unter  
veränderlichen Umweltbedingungen**



# **Hochpräzise Bestimmung der Form- und Orthogonalitätsabweichungen einer Spiegelecke und Untersuchung des Verhaltens unter veränderlichen Umweltbedingungen**

Haifeng Xu



Universitätsverlag Ilmenau  
2018

# Impressum

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 2. Juni 2017

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte  
(Universität Erlangen-Nürnberg)

3. Gutachter: Dr.-Ing. Denis Dontsov  
(SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau)

Tag der Verteidigung: 30. November 2017

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

**ISBN** 978-3-86360-171-3 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017000501

---

Titelgrafik: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau



# Kurzfassung

Die rasanten Entwicklungen der letzten Jahre insbesondere in der Halbleitertechnik und in verschiedenen Präzisionstechnologien erfordern immer präzisere Fertigungsprozesse, die bis an die physikalischen Grenzen vordringen. Deshalb wurde am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau eine neue Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPM-Maschine) NPM-200 mit einem Messvolumen von 200 mm x 200 mm x 25 mm und einer gesicherten Messauflösung von 80 pm entwickelt. Das Koordinatensystem der NPM-Maschinen wird durch ein Interferometer-Raumspiegelsystem gebildet. Die Herstellung hochpräziser Spiegelflächen einer Raumspiegelecke mit höchsten Anforderungen an die Ebenheit ist nicht nur technisch schwierig, sondern auch sehr kostspielig. Die Abweichungen von Ebenheit und Orthogonalität der drei senkrecht zueinander angeordneten Flächen bestimmen die Grenzen der erreichbaren Messunsicherheit. Daher ist es notwendig, vorhandene systematische Abweichungen der Spiegelflächen zu ermitteln und zu korrigieren.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die hochpräzise Bestimmung der Topographien der Spiegelflächen der Raumspiegelecke mit einem Fizeau-Interferometer und der Stitching-Technologie. Das Subapertur-Stitching-Interferometer für sehr große Messbereiche bis 350 mm x 350 mm besteht aus einem hochpräzisen XY-Verschietisch, einem handelsüblichen Fizeau-Phasenschiebe-Interferometer mit einer 6 Zoll Apertur und einer Raumspiegeleckenbaugruppe mit integrierter Justiereinrichtung. Eine speziell entwickelte Software „SmartStitching“ wird verwendet, um die aufgenommenen Messdaten der Subaperturen zu einer gesamten Topographie zu rekonstruieren. Der Stitching-Algorithmus kompensiert nicht nur Positionierfehler, die durch Führungsfehler des Lineartisches während der Verschiebung verursacht werden, sondern auch systematische Fehler wie z. B. Abbildungsfehler. Die absolute Topographie des Referenzspiegels wurde im Vorfeld durch den Multi-Rotations-Drei-Platten-Test kalibriert. Bei bekannter Formabweichung des Referenzspiegels können die vorhandenen systematischen Abweichungen des Phasenschiebe-Interferometers korrigiert werden. Die Topographie des Referenzspiegels wurde dann im Datenverarbeitungssystem gespeichert, damit sie zur Korrektur systematischer Abweichungen verwendet werden kann. Weiterhin werden in dieser Arbeit andere Einflussfaktoren untersucht, z. B. Messabweichungen, die durch das Subapertur-Stitching-Interferometer verursacht werden, und akkumulierte Abweichungen, die durch den Stitching-Algorithmus verursacht werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die hochpräzise Bestimmung der Abweichung der Orthogonalität zwischen den Messspiegeln (xy-, xz- und yz-Messspiegel) einer Raumspiegelecke. Zwei Messverfahren wurden für die Bestimmung der Winkelabweichungen eingesetzt. Die Winkel zwischen den x- und y-Spiegeln werden mit Hilfe von zwei Pentaprismen, einem kalibrierten rechtwinkligen Prisma und einem hochauflösenden elektronischen Autokollimator bestimmt. Diese Kalibriermethode verwendet zwei horizontal zueinander ausgerichtete Pentaprismen und ein hochpräzises rechtwinkliges Prisma als 90°-Winkelnormale, um Winkelfehler zwischen der x- und y-Spiegelfläche einer Raumspiegelecke zu bestimmen. Das hochpräzise rechtwinklige Prisma wurde im Vorfeld kalibriert. Die Winkel zwischen den x- und z-Spiegeln werden mit Hilfe von zwei gegeneinander ausgerichteten Pentaprismen und einem Autokollimator kalibriert. Die Winkelabweichung zwischen den x- und z-Spiegeln der Raumspiegelecke ist der Differenzwert vom Messwert des Autokollimators und der Winkelabweichung beider Pentaprismen. Die Rechtwinkligkeitsabweichung zwischen den y- und z-Spiegeln wird in gleicher Weise kalibriert. Um systematische Abweichungen zu minimieren, ist es erforderlich, ein Kalibrierverfahren für Pentaprismen mittels eines Fizeau-Interferometers umzusetzen. Der Drei-Pentaprismen-Test wird verwendet, um die absoluten Winkelfehler der Pentaprismen in vertikaler Lage zu bestimmen. Die Genauigkeit für diese Methode wird auf 0,2 arcsec geschätzt und wird durch die Kalibrierunsicherheit der Pentaprismen bestimmt. Alle gemessenen Orthogonalitätsabweichungen werden abschließend quantifiziert und mit den Topographiedaten der Raumspiegelecke für die Korrektur kombiniert.

# Abstract

In recent years, especially the rapid development of semiconductor technology and various precision technologies, the requirement of the manufacturing processes is more and more precise, which is close to the physically possible limit. Therefore, at the Institute of Process Measurement and Sensor Technology of Ilmenau University of Technology, a new nanopositioning and nanomeasuring machine (NPM-Machine) NPM-200 with a measuring range of 200 mm x 200 mm x 25 mm and a resolution of 80 pm was developed. The coordinate system of these machines is built by the used interferometer mirror corner system. As the highest demands on the flatness, the mirror corner system with high-precision mirror surfaces is highly difficult in technique and pretty expensive. The manufacturing accuracy limits the flatness of the outer surface of the corner mirrors and their angular position to each other. Thus, it is necessary to determine and correct existing systematic deviations of the mirror surfaces.

The subject of this thesis is the precise interferometric measurement of the optical mirror surface topographies of the mirror corner using sub-aperture interferometer in combination with a stitching approach. The sub-aperture stitching interferometer system for large plane surfaces (up to 350 x 350 mm<sup>2</sup>) consisted of an XY precision stage system, such as a commercial Fizeau phase-shifting interferometer of 6-inch aperture and a switchable mirror assembly. Special stitching software “SmartStitching” was used to reconstruct a full-aperture phase map from a sequence of sub-aperture measurements. The stitching algorithm compensates the positioning errors by the stage mechanics and the systematic errors such as imaging distortion and reference wave. The absolute topography of the reference flat was determined by using the multi-rotation three-flat test beforehand. Then, the topography of this reference flat was stored in the data processing system to correct systematic errors. Furthermore, other influencing factors are presented in this thesis, e.g., measurement errors caused by the sub-aperture stitching interferometer and the accumulated error caused by the stitching algorithm.

Another substantial part of the thesis is the precise determination of the 90-deg error of dihedral angles (xy, xz and yz mirror) of the mirror corner. Two methods of measurement are selected. The angles (90-deg error) between the x- and y- mirrors are calibrated with the help of two pentaprisms, a right-angle prism and a high-resolution electronic autocollimator. This calibration method applies two vertically aligned pentaprisms and a high precision right-angle prism as the normal (90° angle gauge block) to determine the angular error of the mirror cube. The high precision right-angle prism is calibrated in

advance. The angles between the x and z mirrors are calibrated with the help of two pentaprisms and an autocollimator. The difference in vertical angle registered by the autocollimator then gives the angle between the x and z mirrors. The angle between the y and z mirrors is calibrated in the same way. To reduce the systematic errors, it is necessary to implement a procedure of calibrating pentaprisms using a Fizeau interferometer. The three-prism method is used to achieve the absolute measurement of the deflection angles in the Fizeau interferometer. The accuracy of this calibration method estimated to be 0.2 arcsec and is determined by the calibration uncertainty of the pentaprisms. All orthogonal deviations of the corner mirror are finally quantified and combined with the topography data of the corner mirror for correction.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske, Leiter des Fachgebietes Fertigungs- und Präzisionsmesstechnik, für seine persönliche Unterstützung und wohlwollende Förderung meiner Person und Arbeit. Auch möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Grünwald und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich meinen besonderen Dank aussprechen, denn sie ermöglichten mir die reibungsfrei Bearbeitung des Themas durch die Bereitstellung finanzieller und materieller Mittel. Ebenso möchte ich mich bei allen Kollegen des Instituts für Prozessmess- und Sensortechnik herzlich bedanken. Durch die stets konstruktive Zusammenarbeit und das ausgesprochen angenehme Arbeitsklima trugen sie in einem erheblichen Maße zum Gelingen der vorliegenden Arbeit bei.

Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Füßl, Herrn Dr.-Ing. Andreas Müller und Herrn Dipl.-Ing. Dietmar Kollhoff ((GBS) mbH) für die wertvollen Diskussionen und Hilfestellungen während meiner Tätigkeit. Sie haben mich durch die vielen fruchtbaren und anregenden Diskussionen stets motiviert und somit wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen. Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern der SIOS Meßtechnik GmbH, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Walter Schott, Herrn Dr.-Ing. Denis Dontsov und Herrn Dr.-Ing. Ilko Rahneberg für die stets konstruktive Zusammenarbeit herzlich bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank der IMMS gGmbH und Herrn Dipl.-Ing. Steffen Hesse für die Hilfestellungen und Unterstützung.

Für die gewinnbringenden fachlichen Diskussionen bei der Durchsicht des Manuskriptes danke ich Herrn Dipl.-Ing. Daniel Kapusi und Frau Dipl.-Ing. Susanne Ecke.

Meine besondere Anerkennung gilt auch meiner Eltern, Schwiegereltern und meiner Oma für die immerwährende fürsorgliche Unterstützung, ihren Beistand und ihre aufmunternden Worte. Mein innigster Dank gilt meiner geliebten Frau, die mir stets zur Seite stand und ein großer Rückhalt war.

Ilmenau, im März 2017

Haifeng Xu



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung und Überblick .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Großflächige Topographiemessung .....	6
2.2 Absolute Kalibrierung des Referenzspiegels eines Fizeau-Interferometers .....	11
2.3 Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung .....	16
2.4 Kapitelzusammenfassung .....	21
<b>3 Entwicklung von Verfahren zur Messung und Charakterisierung der Messspiegel einer Raumpiegelecke .....</b>	<b>23</b>
3.1 Aufbau und Funktionsweise des Messsystems .....	25
3.2 Charakterisierung der Topographie durch Rauheitskennwerte .....	29
3.3 Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels .....	31
3.3.1 Klassischer Drei-Platten-Test .....	31
3.3.2 Drei-Platten-Test zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels .....	39
3.4 Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung .....	47
3.5 Subapertur-Stitching-Verfahren für großflächige Topographiemessung .....	55
3.5.1 Stitching-Software „SmartStitching“ .....	57
3.6 Kapitelzusammenfassung .....	65
<b>4 Topographiemessung einer Raumpiegelecke der NMM-1 .....</b>	<b>66</b>
4.1 Raumpiegelecke der NMM-1 .....	66
4.2 Messprozess für Topographiemessung einer NMM-1-Raumpiegelecke .....	69
4.3 Auswertung und Analyse der Messwerte .....	71
4.4 Einfluss der Gewichtskraft auf die z-Spiegelplatte der Raumpiegelecke .....	76
4.4.1 Untersuchung der Kriechvorgänge der z-Spiegelplatte bei konstanter statischer Belastung .....	78
4.4.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit unterschiedlichen Messobjektmassen .....	80
4.5 Kapitelzusammenfassung .....	81

<b>5</b>	<b>Topographiemessung einer Raumspiegelecke der NPMM-200 .....</b>	<b>83</b>
5.1	Messprozess für Topographiemessung der x- und y-Spiegelfläche .....	84
5.1.1	Darstellung des Messablaufs .....	85
5.1.2	Auswertung und Analyse der Messdaten .....	88
5.2	Messprozess für großflächige Topographiemessung der z-Spiegelfläche .....	92
5.2.1	Darstellung des Messablaufs .....	93
5.2.2	Auswertung und Analyse der Messdaten .....	96
5.2.3	Untersuchung der Langzeitstabilität der z-Spiegelfläche über einen Zeitraum von drei Jahren .....	102
5.3	Kapitelzusammenfassung .....	103
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der Spiegelflächen einer Raumspiegelecke der NMM-1 .....</b>	<b>105</b>
6.1	Messprinzip und Messaufbau .....	105
6.2	Absolute Messfahren zur Kalibrierung von Pentaprismen .....	110
6.3	Justageprozeduren und zugehörigen Parametern .....	114
6.4	Ergebnis und Auswertung .....	119
6.5	Kapitelzusammenfassung .....	121
<b>7</b>	<b>Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der Spiegelflächen einer Raumspiegelecke der NPMM-200 .....</b>	<b>122</b>
7.1	Bestimmung der Orthogonalität der xy-Spiegelflächen .....	122
7.1.1	Messtechnische Verifikation des Algorithmus zur Winkelmessung .....	126
7.2	Bestimmung der Orthogonalität der xz-/ yz-Spiegelflächen .....	129
7.3	Kapitelzusammenfassung .....	133
<b>8</b>	<b>Abweichungsanalyse des Messsystems zur Bestimmung der Formabweichungen einer NPMM-200-Raumspiegelecke .....</b>	<b>135</b>
8.1	Abweichungsanalyse des Messsystems zur Topographiemessung .....	135
8.1.1	Messabweichungen bedingt durch Fizeau-Interferometer .....	136
8.1.2	Messabweichungen bedingt durch die Referenzplatte .....	140
8.1.3	Messabweichungen bedingt durch das Subapertur-Stitching-Verfahren .....	145
8.1.4	Gesamte Messunsicherheit der Topographiemessung .....	153
8.2	Abweichungsanalyse des Messsystems zur Winkelmessung .....	154
8.2.1	Messabweichungen bedingt durch Führungsabweichungen des Mehrkoordinaten-Direktantriebssystems .....	154
8.2.2	Messabweichungen bedingt durch den Pyramidalfehler .....	157
8.2.3	Messabweichung bedingt durch den Kalibrierabweichungen der Pentaprismen .....	159
8.2.4	Gesamte Messunsicherheit der Winkelmessung .....	161
8.3	Kapitelzusammenfassung .....	162



---

<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>163</b>
	<b>Anhang A: Topographische Korrekturdaten einer NMM-1-Raumspiegelecke .....</b>	<b>166</b>
	<b>Anhang B: Ergebnisse der Untersuchungen mit unterschiedlichen Messobjektmassen.....</b>	<b>169</b>
	<b>Anhang C: Topographische Korrekturdaten einer NPMM-200-Raumspiegelecke .....</b>	<b>171</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>172</b>

# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

AKF	Autokollimationsfernrohr
CAD	rechnerunterstütztes Konstruieren, von engl. <i>computer-aided design</i>
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
FEM	Finite-Elemente-Methode
GUM	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, engl.: <i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
He-Ne	Helium-Neon
IMMS	Institut für Mikroelektronik und Mechatronik-Systeme gGmbH
MKDA	Mehrkoordinaten-Direktantriebssystem des IMMS
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NMM	Nanomessmaschine, engl.: <i>nano measuring machine</i>
NPMM	Nanopositionier- und Nanomessmaschine, engl.: <i>nanopositioning and nanomeasuring machine</i>
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SFB	Sonderforschungsbereich

## Formelzeichen

### Lateinische Buchstaben

$A$	Fläche
$D$	Durchmesser
$d$	Abstand, Dicke der Referenzplatte
$F$	Kraft
$h$	Höhe
$g$	Erdbeschleunigung

$l$	Länge
$l_t$	Totstrecke einer Interferometeranordnung
$m$	Masse
$n$	Brechzahl, Zählerstand
$p$	Druck
$p_w$	Partialdruck des Wasserdampfes
$RH$	relative Luftfeuchtigkeit
$S_a$	axiale Deformation der Referenzplatte
$S_r$	radiale Deformation der Referenzplatte
$s$	Abstand, Weg
$t$	Temperatur, Zeit
$X, x, \dots x$	Länge, Achsenbezeichnung
$Y, y, \dots y$	Länge, Achsenbezeichnung
$Z, z, \dots z$	Länge, Achsenbezeichnung
$X_i$	Bezeichnung der Subsegmente der x-Spiegelfläche
$Y_i$	Bezeichnung der Subsegmente der y-Spiegelfläche
$Z_i$	Bezeichnung der Subsegmente der z-Spiegelfläche

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	Winkel, Rollwinkel
$\beta$	Winkel, Nickwinkel, Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der Spiegelflächen der Raumspiegelecke
$\gamma$	Winkel, Gierwinkel
$\phi$	Drehwinkel
$\varphi$	Winkel, Winkelfehler des Pentaprismas
$\lambda$	Wellenlänge

$\lambda_0$	Vakuumwellenlänge
$\delta$	gemessener fehlerbehafteter Gesamtwinkel
$\theta$	Pyramidalablenkungsfehler
$\rho$	linearer Kreuzkorrelationskoeffizient

Nicht aufgeführte Formelzeichen und Abkürzungen sind an den entsprechenden Textstellen näher erläutert.

# 1 Einleitung und Überblick

Die Nanotechnologie gilt weltweit als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Die rasanten Entwicklungen der letzten Jahre insbesondere in der Halbleitertechnik und in verschiedenen Präzisionstechnologien erfordern immer präzisere Fertigungsprozesse, die bis an die physikalischen Grenzen vordringen. Für den wichtigen Aspekt der Qualitätssicherung dieser Fertigungsprozesse bedarf es einer geeigneten Messtechnik mit Genauigkeitsanforderungen vom Nano- bis in den Sub-Nanometerbereich. Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (PMS) wird seit vielen Jahren auf dem Gebiet der Nanopositionier- und Nanomessmaschinen geforscht und es wurde gemeinsam mit der SIOS Messtechnik GmbH eine NPM-Maschine (NMM-1) entwickelt und aufgebaut. Die NMM-1 verfügt über eine gesicherte Auflösung von 0,1 nm in einem Messvolumen von 25 mm x 25 mm x 5 mm.

Von 2002 bis 2013 wurde im DFG-Sonderforschungsbereich (SFB) 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ intensiv an den wissenschaftlichen Grundlagen zur Verringerung der Messunsicherheit und Verbesserung der Reproduzierbarkeit bei großen Messvolumina (bis zu 450 mm x 450 mm x 80 mm), Messauflösungen bis 0,01 nm und Reproduzierbarkeiten kleiner als 1 nm von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen erfolgreich geforscht.

Im Rahmen eines Transfer- und Verbundprojektes NPMM 200 wurde am Institut eine neue NPM-Maschine (NPMM-200) mit einem Messvolumen von 200 mm x 200 mm x 25 mm und einer gesicherten Messauflösung von 0,02 nm entwickelt, aufgebaut und untersucht. Eine wesentliche Hauptkomponente einer solchen NPM-Maschine ist eine Raumspiegelecke, deren messtechnische Parameter, insbesondere Ebenheit und Orthogonalität die Voraussetzungen für ein erfolgreiches metrologisches Korrekturkonzept der NPM-Maschine sind. Die drei Normalenvektoren der Messspiegelflächen der Raumspiegelecke dienen dabei als Referenzkoordinatensystem in der NPM-Maschine.

Die Herstellung hochpräziser Spiegelflächen für eine Raumspiegelecke mit höchsten Anforderungen an die Ebenheit und Orthogonalität ist technisch höchst aufwendig und kostspielig und daher unter ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet nicht sinnvoll. So betragen beispielsweise die Herstellungskosten der verwendeten Raumspiegelecke der NPM-200 ca. 30000 Euro. Aber trotzdem limitieren die Fertigungsgenauigkeiten die Ebenheit der Spiegelflächen der Raumspiegelecke und deren Orthogonalität zueinander. Außerdem berücksichtigen die vom Hersteller angegebenen Formabweichungen der Raumspiegelecke nicht ihren montierten Einbauzustand, wodurch Einspannkräfte und die Wirkung der Gravitation bei der Betrachtung vernachlässigt bleiben. Dass die Formabweichung im Einbauzustand aber signifikant vom nicht eingebauten Zustand abweicht, wurde durch eine FEM-Analyse nachgewiesen [56]. Daher ist es immer notwendig, vorhandene systematische Abweichungen der Spiegelflächen im montierten Zustand (nahezu wie eingebauter Zustand in NPM-Maschine) zu ermitteln und zu korrigieren, um höchsten Ansprüchen an die Messunsicherheit der NPM-Maschinen gerecht zu werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden daher entwickelte Messverfahren zur hochpräzisen Bestimmung der Formabweichungen aller drei Messflächen einer Raumspiegelecke und der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Messspiegeln dargestellt. Mit Hilfe dieser Mess- und Korrekturverfahren soll künftig auch der Einsatz kostengünstigerer Raumspiegelecken in NPM-Maschinen ermöglicht werden, welche mit größerer Fertigungstoleranz hergestellt werden können.

Die Schwerpunkte dieser Arbeit liegen deshalb auf der experimentellen Bestimmung der Parameter für das geometrische Modell der Raumspiegelecke im montierten Zustand und der Überprüfung der Langzeitstabilität dieser Parameter. Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

Zunächst wird in Kapitel 2 der gegenwärtige Stand der Technik bei der Entwicklung von absoluten Kalibriermethoden des Referenzspiegels eines Phasenschiebe-Interferometers (Fizeau-Interferometer) dargestellt. Derzeit international etablierte optische Messverfahren zur großflächigen Topographiemessung werden erläutert. Die Besonderheiten jedes Messverfahrens werden im Einzelnen beschrieben.

Im Kapitel 3 werden das Funktionsprinzip und der Messaufbau für die topographische Untersuchung sowohl der Raumspiegelecke der NPM-1 als auch der großen Raumspiegelecke der NPM-200 gezeigt. Das Messsystem basiert auf einem Phasenschiebe-Interferometer (6 Zoll Zygo-GPI-Interferometer) der Firma Zygo mit einer 152 mm Apertur. Dabei wird auch Augenmerk auf die Kalibrierung des Referenzspiegels des Phasenschiebe-Interferometers gelegt. Mittels des klassischen Drei-Platten-Tests können nur Profillinien (horizontal und vertikal) gemessen werden [76]. Aus diesem Grund

wird in dieser Arbeit der erweiterte sogenannte Multi-Rotations-Drei-Platten-Test angewandt [54], um die vollständige Topographie des Referenzspiegels aus den Messdaten zu berechnen. Aufgrund der begrenzten Größe des Referenzspiegels können lediglich ausschnittsweise Messungen der Topographie erfasst und der gesamte Messbereich der großen Raumspiegelecke auf diese Weise nicht innerhalb eines einzelnen Messvorganges komplett gemessen werden. Daher erfolgte die Verknüpfung der Teilmessergebnisse mittels Stitching-Verfahren zu einer Gesamttopographie. Hierzu wurde die Integration eines Verschiebetisches in den Messaufbau erforderlich.

Im Kapitel 4 wird das eingesetzte Messsystem zur hochpräzisen Topographieuntersuchung der x-, y- und z-Spiegelflächen der Raumspiegelecke der NMM-1 beschrieben. Dabei werden zuerst die Raumspiegelecke der NMM-1 und der entsprechende Messprozess beschrieben. Danach folgt die Auswertung und Analyse der erfassten Messdaten. Anschließend werden experimentelle Untersuchungen mit unterschiedlichen Gewichtsmassen, die auf der Spiegelecke lasten, durchgeführt, um die Kriecherscheinungen bei starken Belastungen zu repräsentieren.

Im Kapitel 5 sind die Messverfahren für das Vermessen der Topographie sowohl der verspiegelten x- und y-Fläche mit einer Größe von 250 mm x 25 mm als auch der z-Fläche mit einer Größe von 250 mm x 250 mm detailliert beschrieben. Besonders der z-Spiegel der Raumspiegelecke verformt sich im eingebauten Zustand unter dem Einfluss von Gravitation und Klemmungen. Dieses Kapitel befasst sich mit der Ermittlung und der Datenanalyse der Topographie über die komplette Fläche der großen Raumspiegelecke. Zu den drei gemessenen Topographien werden drei Ausgleichsflächen berechnet, deren Normalenvektoren als Referenzkoordinatensystem in der NPM-Maschine dienen. Weiterhin werden aus den Topographiedaten jeweils zweidimensionale, polynomial approximierten Korrektur-Matrizen für die Berichtigung der Glattheitsabweichungen der Spiegeltopographie berechnet.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Dissertation war die Bestimmung der Abweichung der Orthogonalität zwischen den Spiegeln (xy-, xz- und yz-Spiegel) der Raumspiegelecke. Das Konzept der Vermessung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Spiegeln mit Hilfe von hochpräzisen fotoelektrischen Autokollimationsfernrohren (Elcomat HR und Elcomat 3000) von Möller-Wedel wird in Kapitel 6 und 7 vorgestellt. Die Orthogonalitätsabweichungen der drei Messspiegelflächen der Raumspiegelecke führen zu systematischen Abweichungen der gemessenen Positionen vom NPM und müssen berücksichtigt werden. Dies erfolgt durch eine Transformation in kartesische Koordinaten der NPM-Maschine anhand der ermittelten Winkelabweichungen.

Eine Analyse der Messabweichungen findet im Kapitel 8 statt. Umwelteinflüsse sowie Messabweichungen des Messsystems stellen sowohl bei interferometrischen Messungen im Nanometerbereich als auch bei hochpräzisen Winkelmessungen sehr große Störfaktoren dar. Die Abweichungsquellen werden im Einzelnen untersucht bzw. beurteilt und deren Auswirkungen auf die Topographie- und Winkelmessung berücksichtigt.

Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und einem Ausblick.

Diese Arbeit wurde im DFG-Sonderforschungsbereich 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ als Teilprojekt A1 mit dem Thema „Metrologie der NPM-Maschinen“ gefördert.



## 2 Stand der Technik

Nach langjähriger Forschung und Entwicklung wurde an der Technischen Universität Ilmenau am Institut PMS in Zusammenarbeit mit der Firma SIOS eine universell einsetzbare Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM-1) konzipiert und gebaut. Der Messbereich der NMM-1 beträgt 25 mm in x- und y-Richtung sowie 5 mm in z-Richtung mit einer Längenmessauflösung von  $< 0,1$  nm und einer Reproduzierbarkeit von unter zehn Nanometern [44, 48, 49, 86]. Diese NPM-Maschine ist bis jetzt die Einzige, die in Serie hergestellt wird. Sie ist bereits weltweit mehrfach erfolgreich im Einsatz [89]. Inzwischen wurde am Institut im Rahmen eines Transfer- und Verbundprojektes des SFB 622 eine neue NPM-Maschine (NPM-200) mit einer Messauflösung von 0,08 nm in einem stark vergrößerten Messvolumen von 200 mm x 200 mm x 25 mm entwickelt. Als wichtige Hauptkomponente dient für beide NPM-Maschinen jeweils eine Raumspiegelecke, deren drei Normalenvektoren der Messspiegelflächen als Referenzkoordinatensystem in der NPM-Maschine dienen.

Die Raumspiegelecken wurden im Laufe der Zeit stetig weiterentwickelt. Es kamen im Laufe der Entwicklungen unterschiedliche Materialien (BK7, Quarz und Zerodur®) und Designvarianten für immer größere Anforderungen bezüglich des Messvolumens zum Einsatz [45, 56, 73].

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit kommt ein hochpräzises optisches Messverfahren mittels eines Phasenschiebe-Interferometers (6 Zoll Zygo-GPI-Interferometer) zur Bestimmung der Formabweichungen einer Raumspiegelecke insbesondere im Hinblick auf veränderliche Umweltbedingungen zum Einsatz.

Um die Anforderungen an dieses Messverfahren spezifizieren zu können, soll zunächst ein Überblick über gegenwärtige Anwendungen der optischen großflächigen Topographiemessung gegeben werden. Weitere weltweite Entwicklungen auf dem Gebiet der absoluten Kalibrierung des Referenzspiegels werden anschließend genannt. Letztlich

soll die interferometrische Winkelmessung für die Winkelabweichung zwischen den Spiegeln der Raumspiegelecke dargestellt werden.

## 2.1 Großflächige Topographiemessung

In der Präzisionsoptik können mit heutigen Bearbeitungsverfahren die Spiegeloberflächen mit Nanometer-Präzision über größere Bereiche hergestellt werden. Die Kenntnis über die erreichten topographischen Parameter der Messspiegelflächen ist Voraussetzung für die erfolgreiche Modellimplementierung in ein metrologisches Korrekturkonzept von NPM-Maschinen. Deshalb ist die Zielstellung der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines speziell für diesen Zweck effizienten, technologisch-ökonomischen und technisch zuverlässigen optischen Messsystems zur flächenhaften Erfassung (Topographiemessung) von Daten, für sehr große Messbereiche bis 350 mm x 350 mm. Dieses Messsystem soll für Nanometer- bzw. Subnanometerauflösungen ausgelegt sein und zugleich sehr hohe Messgeschwindigkeiten zulassen.

Seit Jahrzehnten werden in der Optikindustrie an die Topographiemessung von hochpräzisen, optischen Oberflächen von größeren und schwereren Prüflingen sehr hohe Forderungen gestellt. Für die Topographiemessung hochqualitativer optischer Oberflächen wurden über lange Zeit überwiegend optische Messverfahren in der Optikindustrie eingesetzt. Unter den optischen Verfahren zeichnen sich interferometrische Verfahren durch ihre hohe Messgeschwindigkeit, hohe Reproduzierbarkeit und hohe Messgenauigkeit aus. Sie eignen sich besonders zur berührungslosen und zerstörungsfreien, hochaufgelösten Erfassung der Daten im Nanometerbereich, wobei die Messdaten mittels digitaler rechnergestützter Bildverarbeitung weiterverarbeitet werden können.

### Interferometrische großflächige Topographiemessung mit dem Stitching-Verfahren

Das Fizeau-Interferometer hat sich in den letzten 30 Jahren wegen seines stabilen Aufbaus zum Standardmessgerät zur Bestimmung der Topographie von nahezu ebenen Oberflächen wie beispielsweise Planflächen entwickelt. Es entsteht eine Interferenz zwischen einer Prüflingsoberfläche und einer nahe am Prüfling herangebrachten Referenzfläche des Referenzspiegels. Das Interferenzbild wird durch eine CCD-Kamera aufgenommen und ausgewertet. Die Messdaten beinhalten neben den Formabweichungen des Prüflings auch die Formabweichungen (systematische Abweichungen) des Referenzspiegels. Letztere müssen in den gemessenen Daten korrigiert werden, um ausschließlich die Topographie des Prüflings zu erhalten. Dieses Verfahren wird als „Absolutverfahren“ oder „absolute Formbestimmung“ bezeichnet. Bei den „Absolutverfahren“ muss die Formabweichung des

verwendeten Referenzspiegels vorher exakt ermittelt werden, welche zur Kalibrierung und zur Korrektur des Ergebnisses verwendet werden kann. Im folgenden Abschnitt werden mehrere Verfahren zur absoluten Kalibrierung des Referenzspiegels erläutert (vgl. Abschnitt 2.2). Der laterale Messbereich des Interferometers ist durch die Größe des Referenzspiegels und der Strahlaufweitungsoptik beschränkt. Die Größe des verwendeten Referenzspiegels beträgt 6 Zoll (ca. 152 mm Durchmesser). Die Formabweichung liegt unter  $\lambda/20$ . In der Optikindustrie sind heutzutage Prüflinge größer als 150 mm Durchmesser keine Seltenheit mehr.



Abbildung 2.1: Kommerzielles interferometrisches Messsystem der Firma Zygo mit großer Apertur (18 Zoll) [106]

Um eine Vollfeldmessung zu realisieren, bei deren sich der gesamte zu vermessende großflächige Prüfling innerhalb eines Messfelds befindet, ist allerdings ein großer Referenzspiegel notwendig. Der amerikanische Fizeau-Interferometer-Spezialist Zygo bietet auch speziell auf Kundenwunsch gefertigte Referenzspiegel mit einem Durchmesser von bis zu 32 Zoll (ca. 813 mm Durchmesser) für das VeriFire Fizeau Interferometer mit einer zertifizierten Formabweichung von  $\lambda/10$  an (vgl. Abbildung 2.1) [104]. Die Herstellungskosten und der Kalibrieraufwand für einen solchen hochpräzisen Referenzspiegel wachsen exponentiell mit dem benötigten Durchmesser an. Daher werden solche großen Referenzspiegel eher im Bereich Forschung und Entwicklung als im industriellen Umfeld verwendet.

Um eine Messung eines Prüflings mit großen Flächen zu realisieren, hat Bray im Jahr 1997 ein mit einem kleinflächig messenden Fizeau-Interferometer (Referenzspiegel mit 100 mm Durchmesser) ausgestattetes Messsystem zur Topographiemessung für sehr große Messbereiche von 560 mm x 400 mm unter Beibehaltung der Messauflösung und

Messgenauigkeit vorgestellt [9]. Das sequenziell messende Verfahren wurde „Subapertur-Stitching“ genannt. Das nur ausschnittsweise messende Fizeau-Interferometer wird in mehreren Schritten über die gesamte Oberfläche (Apertur) eines Prüflings geführt (vgl. Abbildung 2.2). An den einzelnen Positionen wird dann jeweils eine kleine Teiltopographie vermessen. Dabei wird die Oberfläche des Prüflings (z. B. eines Spiegels) mit geeigneten motorisierten Positionierelementen (XY-Positionierelemente) relativ zum Interferometer bewegt, so dass die Gesamtapertur in eine Reihe von einander sich überlappenden Teilaperturen zerlegt wird. Unter Verwendung eines Umlenkspiegels kann das Messsystem sowohl liegende als auch stehende Prüflinge messen (vgl. Abbildung 2.2b). Durch Verwendung der speziell entwickelten flexiblen Algorithmen können die Teiltopographien zu einer Gesamttopographie rekonstruiert werden [9, 65].

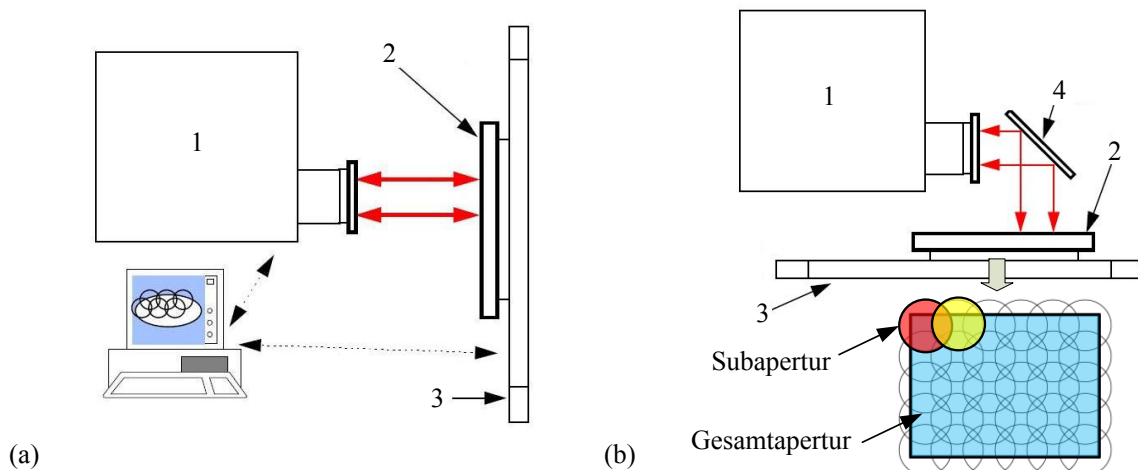


Abbildung 2.2: Prinzipskizze für interferometrische großflächige Topographiemessung mit dem Stitching-Verfahren [9] (1 Fizeau-Interferometer, 2 Prüfling, der größer als das Messfeld des Interferometers ist, 3 XY-Positionierelemente, 4 Umlenkspiegel): (a) Messsystem für stehende Prüflinge, (b) Messsystem für liegende Prüflinge)

Das flächenhafte Messprinzip stellt den größten Vorteil dieses Stitching-Messverfahrens dar. Es sind im Vergleich zur herkömmlichen optischen Punktmessung wesentlich kürzere Messzeiten möglich. Außerdem sind ein gutes Höhenauflösungsvermögen (Fizeau-Interferometer) und geringe Messunsicherheit sowie hohe Wiederholbarkeit vorteilhafte Eigenschaften. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die prinzipbedingte Empfindlichkeit gegenüber einer Fehlpositionierung zwischen den Einzelmessungen. Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz des Stitching-Verfahrens sind möglichst konstante Messbedingungen während der Durchführung aller Teilmessungen. Wenn die einzelnen Teiltopographien von zufälligem Rauschen, einer Temperaturdrift oder von Luftverwirbelungen überlagert sind, gehen die verwertbaren Informationen aus den

Überlappungsbereichen verloren und die Messabweichungen und die Messunsicherheit steigen [46]. Die Fehler der Positionierung in x- und y-Richtung sowie die Verdrehung um die z-Achse gegenüber dem Messpunktraster können zusätzliche Messabweichungen verursachen. Außerdem spiegeln sich die Formabweichungen der Referenzfläche in jedem Teilmessergebnis als systematische Abweichungen wider. Deshalb sollte die Referenzfläche des Interferometers vorher kalibriert werden, um die sich von Messfeld zu Messfeld akkumulierenden systematischen Abweichungen zu minimieren, welche das Gesamtmessergebnis direkt beeinflussen [10, 11].

Neue leistungsfähige, methodische Ansätze und die Weiterentwicklung des Stitching-Verfahrens sind erforderlich, um die Auswirkungen derartiger Messabweichungen zu eliminieren. In letzter Zeit wurden neue Entwicklungen zur Verbesserung des Stitching-Verfahrens für großflächige Topographiemessungen in den Bereichen Hardware- und Software- Korrekturalgorithmen publiziert [10–13, 16–18].

### **Deflektometrische großflächige Topographiemessung mit Winkelmessgeräten**

Ein weiteres bekanntes Verfahren zur Topographiemessung hochqualitativer optischer Oberflächen ist die Deflektometrie. In den letzten Jahren haben deflektometrische Verfahren zur hochgenauen Topographiemessung optischer Oberflächen rasant an Bedeutung gewonnen. In der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) wurde die deflektometrische Messmethode zur präzisen Oberflächenmessung sowohl ebener als auch gekrümmter Oberflächen (Asphären oder Freiformflächen) in den letzten Jahren vorangetrieben [29]. Dabei sind neuartige scannende Abwandlungen, die sogenannte „Direkt-Deflektometrie“ und die „Differenz-Deflektometrie“ (vgl. Abbildung 2.3), entstanden [8, 27, 30, 79, 92]. Diese beiden Messverfahren basieren auf der Messung lokaler Flächenneigungswinkel mit hochpräzisen Winkelmessgeräten (Autokollimatoren) und optisch antastenden Winkelmesssystemen. Beide Messverfahren ermöglichen insbesondere die hochpräzise Vermessung von großen optischen Oberflächen auf eine stabile Art und Weise. Letztendlich stützt sich die deflektometrische Formmessung auf die geradlinige Lichtausbreitung des vom Autokollimator ausgehenden Messstrahls und die Rückführung der Messgröße Winkel. Mit speziellen mathematischen Methoden kann die Topographie der zu messenden Oberfläche rekonstruiert werden [79]. Die beiden in der PTB entwickelten Messverfahren unterscheiden sich in der Bewegung des Pentaprismas (Doppelspiegel) und des Autokollimators sowie in der mathematischen Bestimmung der Topographie. Im Vergleich zur Differenz-Deflektometrie sind die Messzeiten bei der Direkt-Deflektometrie kürzer und die Auswertalgorithmen sind einfacher. Bei der Differenz-Deflektometrie wird der Winkel simultan an zwei zu einander versetzten Positionen, den sogenannten Shear-Positionen, gemessen. Da der verwendete elektronische

Autokollimator mitfährt (vgl. Abbildung 2.3b), ist dieser örtliche Versatz über alle Messungen stets konstant. Aufgrund der differentiellen Messung wirkt sich eine Verkipfung der Probe nicht auf das Messergebnis aus [29].

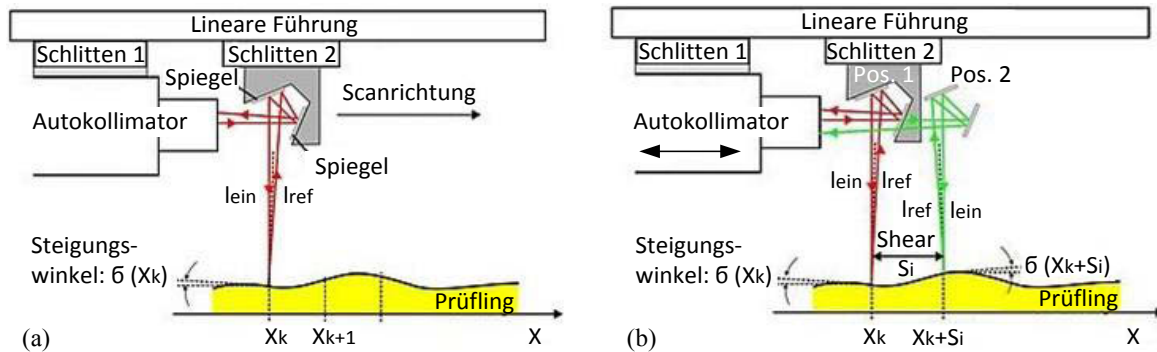


Abbildung 2.3: Prinzipskizze der Direkt- und Differenz-Deflektometrie der PTB [29]: (a) Direkt-Deflektometrie, (b) Differenz-Deflektometrie

In Industrie und Wissenschaft steigen die Forderungen, immer größere und schwerere Prüflinge messen zu können. Aus diesem Grund wurden an der PTB zwei optische Messeinrichtungen, welche auf den obengenannten beiden Deflektometrieprinzipien basieren, zur hochgenauen Ebenheitsmessung installiert (vgl. Abbildung 2.4) [27, 67, 80]. Mit diesen Messeinrichtungen können Prüflinge mit einer Größe von bis zu 1 m Durchmesser und einer Masse von bis zu 120 kg sowohl liegend als auch stehend vermessen werden. Die Messunsicherheiten liegen nach [30] sowohl mit der Direkt- als auch mit der Differenz-Deflektometrie im Sub-Nanometerbereich. Das wurde anhand von virtuellen Experimenten an einem 800 mm großen Prüfling mit einer angenommenen Topographie von 200 nm (PV-Wert) mit Ortsfrequenzen im Bereich von  $1 \mu\text{m}$  bis 1 m geprüft [30]. Die ersten realen Experimente mit der Direkt-Deflektometrie wurden 2011 bei der PTB durchgeführt. Es wurden sieben Scans am Glasprüfling mit einer Scanlänge von 540 mm vorgenommen und jeweils die Steigungen gemessen. Die Abweichungen der gemessenen Steigungen von Scan zu Scan liegen nach [30] im Bereich von 0,01 arcsec. Aus den gemessenen Steigungen ergeben sich durch Integration die Topographien. Die Standardabweichungen der sieben Scans liegen unter 0,5 nm. Damit ist die Grundvoraussetzung für das Erreichen von Subnanometer-Unsicherheiten gegeben.

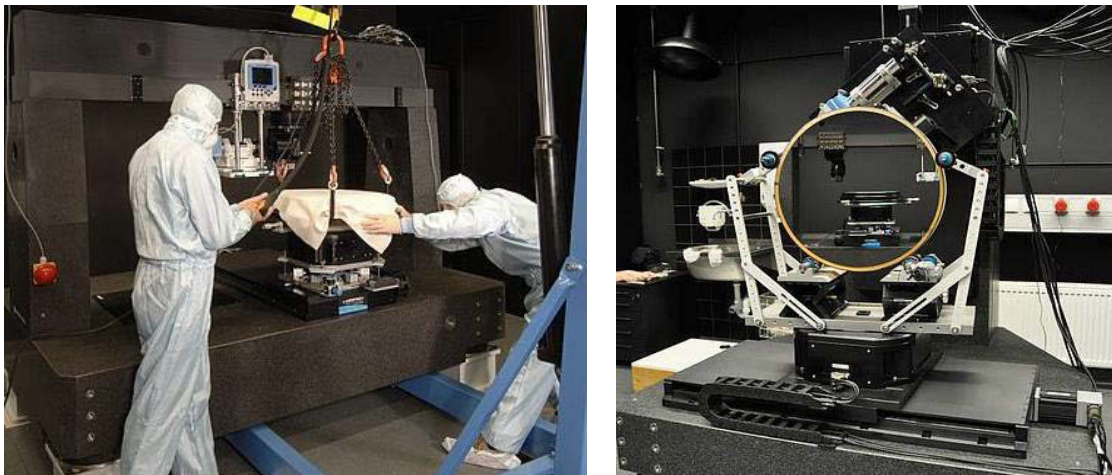


Abbildung 2.4: Die neuen deflektometrischen Messsysteme der PTB, das Messsystem kann sowohl liegende als auch stehende Prüflinge messen [67]

Ein Vorteil der Deflektometrie besteht darin, dass sie im Gegensatz zur Fizeau-Interferometrie nicht auf eine externe, kostenintensive, große Referenzfläche mit bekannter Topographie angewiesen ist, sondern die geradlinige Ausbreitung des Messstrahls des verwendeten Autokollimators als Ebenheitsreferenz dient. Allerdings ist die hochpräzise Kalibrierung des verwendeten Autokollimators sehr anspruchsvoll und aufwändig [37]. Unter exzellenten Bedingungen im Reinraum der PTB wurde der hochauflösende elektronische Autokollimator (Elcomat 3000 von Möller-Wedel) mit einer Standardmessunsicherheit von  $0,004''$  kalibriert [7]. Im Vergleich zu den flächenhaft messenden Stitching-Verfahren sind die punktwise messenden deflektometrischen Verfahren von der PTB in Bezug auf die Messgeschwindigkeit naturgemäß im Nachteil, weil bei den deflektometrischen Verfahren die zu messende Oberfläche Linie für Linie abgescannt werden muss.

## 2.2 Absolute Kalibrierung des Referenzspiegels eines Fizeau-Interferometers

Das GPI-XP-Interferometer mit Phasenschieber der Firma Zygo, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, arbeitet nach dem Prinzip des Fizeau-Interferometers. Der prinzipielle Aufbau eines Fizeau-Interferometers mit dem Verlauf der Strahlen ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Dabei durchläuft ein divergentes Licht-Strahlenbündel einen optischen Strahlteiler und trifft erst auf einen Kollimator und danach auf einen teildurchlässig beschichteten hochgenauen Referenzspiegel, der als Ebenheitsnormal dient. Dieser sollte typischerweise eine Formabweichung von  $\lambda/20$  bis  $\lambda/50$  aufweisen. Ein kleiner Teil des Laserstrahles wird an der Oberfläche des







werden einige wesentliche Verfahren und Methoden zur Kalibrierung des Referenzspiegels vorgestellt, die nach Art und Größe des Kalibrierbereichs geordnet sind.

### Kalibrierung mit Flüssigkeitsspiegel

Eine prinzipiell einfache Kalibriermethode ist die Verwendung eines Normal in Form einer Oberfläche einer ruhenden Flüssigkeit. Schon früher wurde in der PTB ein Quecksilberspiegel mit einem Durchmesser von 300 mm als Ebenheitsnormal eingesetzt, um ebene Flächen zu messen [34]. Die Abweichungen der Oberfläche des Quecksilberspiegels von einer idealen Ebene sind nur wenige Nanometer, wenn strenge Randbedingungen eingehalten werden. Die Flüssigkeitsoberfläche wird durch elektrostatische Entladungen, Vibrationen, geringste Temperaturunterschiede, Verunreinigungen, Magnetfelder und das Gravitationsfeld der Erde stark beeinflusst [2]. Der Quecksilberspiegel befindet sich in einer Silberschale auf einem nichtmagnetischen Metallträger und weist eine Schichtdicke von 200  $\mu\text{m}$  auf (vgl. Abbildung 2.6b). Aufgrund der zahlreichen Nachteile des Quecksilbers, welches ein giftiges und gesundheitsgefährdendes Schwermetall ist, wurde es durch ein hochwertiges Diffusionspumpenöl oder Paraffinöl als Flüssigkeit des Ebenheitsnormals ersetzt [50, 90]. Dieses ist extrem temperaturstabil und besitzt einen niedrigen Dampfdruck sowie keine Hygroskopizität [90].

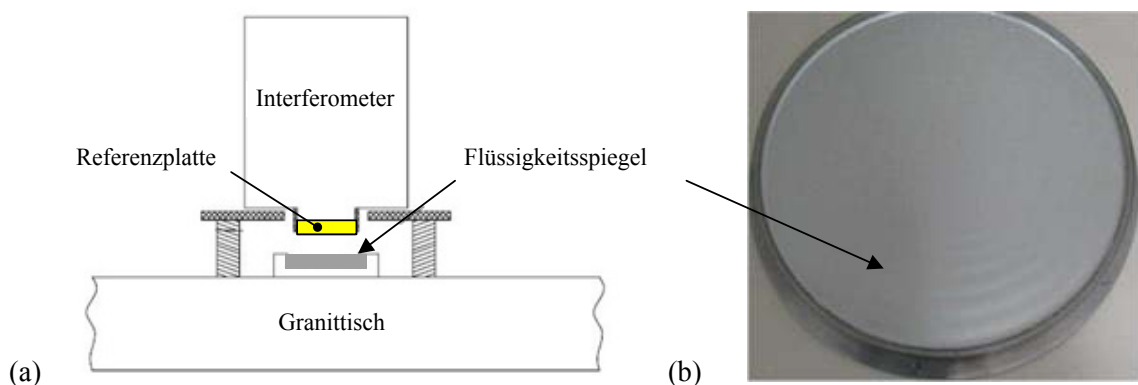


Abbildung 2.6: Kalibrierung des Referenzspiegels eines Fizeau-Interferometers mittels eines Flüssigkeitsspiegels: (a) Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus [90], (b) Quecksilberspiegel der PTB (Durchmesser ca. 300 mm) [66]

Abbildung 2.6a zeigt eine schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur Kalibrierung des Referenzspiegels mittels eines Flüssigkeitsspiegels. Der Flüssigkeitsspiegel wird mittels eines Fizeau-Interferometers vermessen, welches nur in vertikaler Messrichtung betrieben werden kann. Dieses Fizeau-Interferometer ist für die Ebenheitsprüfung von liegenden Referenzplatten optimiert und für die Messung von Prüflingen mit großem Durchmesser von 100 mm bis 310 mm ausgelegt [50, 68, 90]. Die

erweiterte Messunsicherheit für die Ermittlung der Topographie wird mit 7 nm über den gesamten Durchmesser von 90 mm angegeben [90].

### Drei-Platten-Test

Ein häufig verwendetes Verfahren zur Kalibrierung von Referenzspiegeln ist der „Drei-Platten-Test“ [40, 41, 98]. Bereits 1905 hat O. Schönrock lediglich den Gedanken geäußert, durch die Kombination von drei Platten die Abweichungen längs der Durchmesser absolut zu bestimmen [76]. Ein wesentlicher Meilenstein des Drei-Platten-Tests wurde Ende der 60er und Anfang der 70er Jahre erreicht. J. Schwider und G. Schulz stellten neue Absolutverfahren zur Ebenheitsbestimmung vor [77, 78], die auf dem Verfahren von Schönrock basieren. Bei diesem Verfahren werden drei Referenzplatten in mehreren paarweisen Kombinationen mit einem Fizeau-Interferometer gegeneinander gemessen. Eine Kombination wird zusätzlich nach einer 180°-Drehung einer Spiegelplatte erfasst. Aus diesen relativen Messungen können durch Lösung des überbestimmten Gleichungssystems nur einzelne Profillinien einer Plattenfläche absolut bestimmt werden (vgl. Abbildung 2.7) [109].

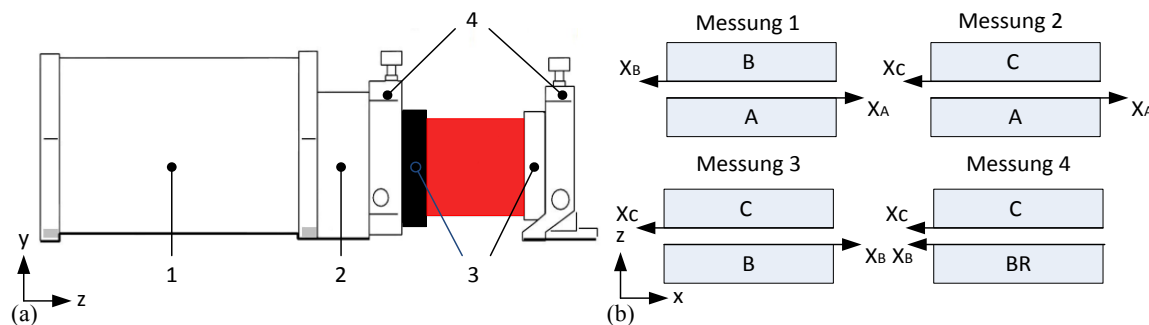


Abbildung 2.7: Prinzip des klassischen Drei-Platten-Tests [109]: (a) schematische Skizze des Messaufbaus: Seitenansicht, (b) Kombination dreier Platten, schematisch: Draufsicht (1 Phasenschiebe-Interferometer, 2 Phasenschieber (Piezoaktuator), 3 zu kalibrierende Spiegelplatten, 4 Justage)

Um die gesamten Topographieabweichungen der Referenzplatten zu ermitteln, wurden verschiedene Ansätze entwickelt. Beim erweiterten sogenannten „*multi-rotation three-flat test*“ von Küchel werden durch Rotation einer Spiegelplatte von 0 bis 180° (z. B. Spiegelplatte B, vgl. Abbildung 2.7 Messung 4) mehrere Interferogramme aufgenommen, die anschließend mittels der „Küchel-Gleichung“ zu einer Gesamtopographie verrechnet werden [54].

Bisher konnte der Drei-Platten-Test für runde Referenzspiegel mit einem Durchmesser von bis zu 320 mm sowohl im liegenden als auch stehenden Zustand mit einer erweiterten Unsicherheit ( $k = 2$ ) unter 0,5 nm durchgeführt werden [14, 42]. Der Drei-Platten-Test ist

technisch sehr aufwendig und erfordert einen hohen Justageaufwand, um die hohe Wiederholbarkeit zu gewährleisten [42]. Bei Messvorrichtungen mit vertikaler optischer Achse (liegende Referenzplatten) erweist sich der Drei-Platten-Test als problematisch, da während des Tests stets eine der drei Platten umgedreht werden muss und diese sich somit aufgrund der Gravitation unterschiedlich durchbiegt [15, 29]. Die Beeinflussung der Gravitation kann durch die FEM-Analyse abgeschätzt werden [91].

Die oben genannten „Drei-Platten-Test“-Verfahren zur Kalibrierung von Referenzspiegeln werden im Kapitel 3 detailliert erklärt und die entsprechenden Ergebnisse präsentiert.

### Traceable Multi Sensor (TMS) Verfahren von der PTB

Die vorgestellten deflektometrischen Verfahren der PTB sind gut geeignet für die Kalibrierung der Referenzfläche des Fizeau-Interferometers [29]. Als eine Alternative zu den deflektometrischen Verfahren stellte die PTB das Traceable Multi Sensor-Verfahren (TMS) für die Messung der Topographie ebener und gekrümmter Flächen vor [81–84, 97]. Das TMS-Verfahren nutzt ein kompaktes Interferometer mit einer Apertur von wenigen mm, das mittels einer Scaneinheit in Schritten über den Prüfling geführt wird (vgl. Abbildung 2.8).

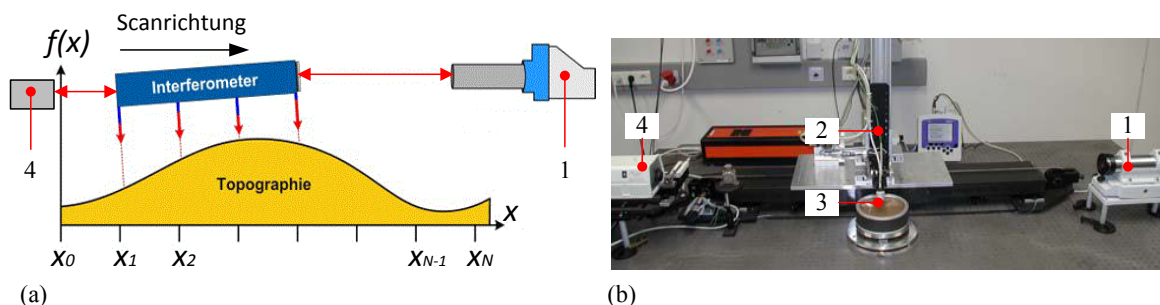


Abbildung 2.8: TMS-Verfahren: (a) Prinzipskizze des TMS Verfahrens [97], (b) Foto des realisierten Messaufbaus mit dem TMS-Verfahren [83] (1 Autokollimator, 2 Abstandsinterferometer, 3 Prüfling, 4 Interferometer)

An jeder einzelnen Position, gemessen mit einem Laserinterferometer, wird jeweils eine Teiltopographie aufgenommen und zusätzlich wird die Verkipfung des Interferometers mit einem Autokollimator erfasst. Aus den aufgenommenen Daten (Teiltopographie) werden mit einem speziell entwickelten TMS-Algorithmus neben der Prüflingtopographie auch die Höhenoffsets der Führung sowie die systematischen Abweichungen des verwendeten Interferometers berechnet [95].

Im Vergleich zu anderen Kalibriermethoden benötigt das TMS-Verfahren keine hochwertige (kostenintensive) Referenzplatte mit gleichen Dimensionen wie der Prüfling

als Ebenheitsreferenz und kann als Scanverfahren auch große oder stark gekrümmte Prüflinge mit hoher lateraler Auflösung absolut vermessen [82]. Das TMS-Verfahren wurde für verschiedene Prüflinge mit typischerweise 150 mm durchgeführt. Eine Reproduzierbarkeit von weniger als 1 nm konnte für ein kompaktes Interferometer verifiziert werden [82, 96].

Wie in diesem Kapitel beschrieben, gibt es verschiedene Messmethoden zur Kalibrierung des Referenzspiegels eines Fizeau-Interferometers wie z. B. Kalibrierung durch Messung gegen einen Flüssigkeitsspiegel, Drei-Platten-Test und TMS Verfahren. Unabhängig vom Verfahren ist bei jeder Kalibrierung zu beachten, dass sich verschiedene Einflüsse auf die Messunsicherheit auswirken. Insbesondere haben mechanische Spannungen von Prüflingsfassungen, die Auswirkung der Gravitation und die Änderung der Umweltbedingungen im Messraum einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die zu kalibrierende Referenzfläche [2]. Es muss daher gewährleistet sein, dass solche Einflüsse minimiert oder genügend modelliert und korrigiert werden. So werden unter anderem die Auswirkungen verschiedener Messabläufe und unterschiedlicher Einbaulagen und Fassungen von Spiegelflächen analysiert.

Nachdem die Übersicht zur Kalibrierung des Referenzspiegels eines Fizeau-Interferometers vorgestellt worden ist, soll im Folgenden auf die Bestimmung der Rechtwinkligkeitsabweichung eingegangen werden, da sie in dieser Arbeit eine wichtige Messaufgabe dargestellt.

## 2.3 Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung

Die Winkel zwischen den Messspiegelflächen der Raumspiegelecke bestimmen die Orthogonalität des Koordinatensystems der NPM-Maschinen und müssen eine sehr hohe Langzeitstabilität aufweisen [45]. Idealerweise sind drei Messspiegelflächen der Raumspiegelecke jeweils orthogonal zueinander angeordnet und die Laserstrahlen (Messachsen) der x-, y- und z-Interferometer sind exakt senkrecht auf die Messspiegelflächen bzw. auf den Abbepunkt ausgerichtet, wie in Abbildung 2.9a dargestellt.

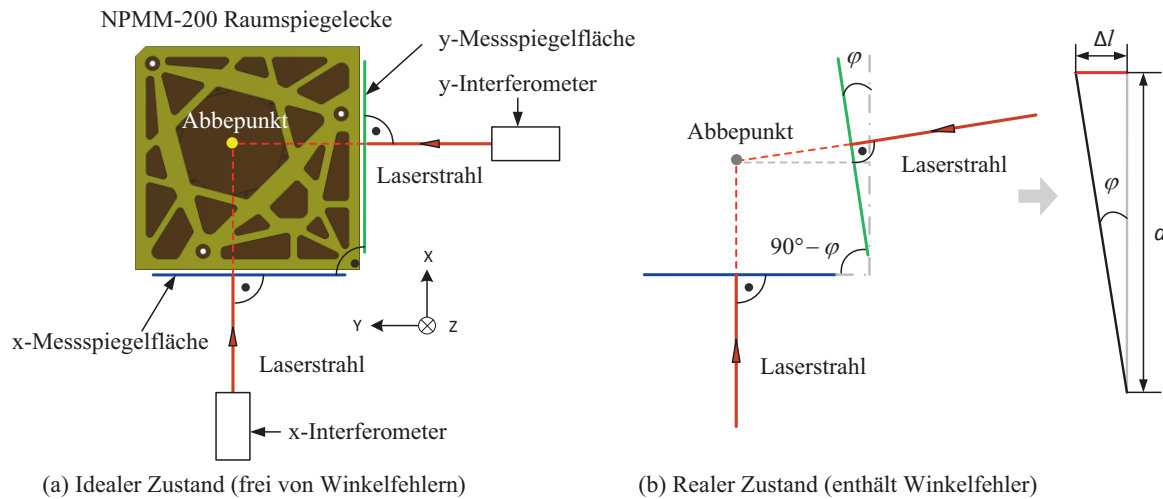


Abbildung 2.9: Geometrie (Orthogonalitätsabweichung) einer NPMM-200-Raumspiegelecke

Beim realen Aufbau verbleiben jedoch, u. a. bedingt durch den Fertigungsprozess, Abweichungen. Es kommt trotz modernster Technologien unter den gegenwärtigen Bedingungen in den optischen Industrien für die Herstellung optischer Komponenten zu Winkelabweichungen, welche als zufällig und technisch quasi unvermeidbar betrachtet werden müssen. Weitere Verbesserungen der Fertigungsgenauigkeiten wären mit einem unverhältnismäßig hohen Fertigungsaufwand verbunden, welcher sich ökonomisch nicht mehr rechtfertigen lässt. Die Winkelabweichungen (Orthogonalitätsabweichung) führen zu Messabweichungen erster und zweiter Ordnung und sind in Abbildung 2.9b beispielhaft dargestellt. Für eine Messung der Verschiebung in y-Richtung entsteht bei konstanter x-Position nur eine Längenmessabweichung zweiter Ordnung. Bei Messungen mit veränderlichen x-Positionen entsteht durch das resultierend schiefwinklige Koordinatensystem zusätzlich eine Messabweichung erster Ordnung.

Die durch eine Orthogonalitätsabweichung der Raumspiegelecke bzw. des Referenzkoordinatensystems verursachte Längen-Messabweichung lässt sich mit Hilfe des dazu orthogonalen Längenmessbereiches  $d$  (max. Messlänge) und der Abweichung der Orthogonalität zwischen den Messspiegeln  $\varphi$  berechnen. Die nachfolgende Berechnung bezieht sich auf die Abbildung 2.9b:

$$\Delta l = d * \tan \varphi \quad (2.1)$$

Für die derzeit verwendete Raumspiegelecke der NMM-1 ist für die maximale Orthogonalitätsabweichung zwischen den Messspiegelflächen laut Hersteller ein Wert von  $< 2''$  gefordert. Bei der NMM-1 beträgt die maximale Messlänge in x- und y-Richtung jeweils  $d = 25 \text{ mm}$ . Daraus ergibt sich nach Formel (2.1) eine maximale Längen-Messabweichung von ca. 242 nm. Im Gegensatz zur NMM-1 wurde die Raumspiegelecke

der NPM-200 mit Orthogonalitätsabweichungen  $< 1'$  hergestellt, um die Herstellungskosten für die NPM-200 in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen zu halten [3]. In diesem Fall beträgt die maximale Längenmessabweichung sogar  $58,2 \mu\text{m}$ . Diese Fertigungstoleranzen reichen jedoch nicht aus, um die angestrebte 3-D-Messunsicherheit von wenigen Nanometern zu erzielen. Deshalb ist es erforderlich, die Abweichung der Orthogonalität zwischen den Messspiegeln der eingesetzten Raumspiegelecke mit höchster Genauigkeit messtechnisch zu erfassen, um sie als systematische Abweichung im Betrieb der NPM-Maschinen rechnerisch in Echtzeit korrigieren zu können. Im Folgenden werden einige wesentliche Messverfahren und Messmethoden zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung vorgestellt.

### Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung mittels Etalon-Platten

Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Messspiegelflächen der Raumspiegelecke der NMM-1 wurde beim Hersteller mit dem sogenannten “Etalon-Platten-Messverfahren” bestimmt. Das Messverfahren wird mit Hilfe eines Fizeau-Interferometers und den Etalon-Platten durchgeführt. Diese bestehen aus zwei ebenen parallelen Glasplatten (vgl. Abbildung 2.10). Die Oberflächen der Etalon-Platten (3) sind voll verspiegelt. Die reflektierenden Platten (3) müssen eine sehr hohe Planität und Parallelität aufweisen. Bei der Orthogonalitätsmessung werden die Strahlen jeweils vom x- und y-Spiegel der Raumspiegelecke auf die Etalon-Platten reflektiert. Die Strahlen reflektieren zurück und werden in Richtung des Referenzspiegels des Fizeau-Interferometers gelenkt.

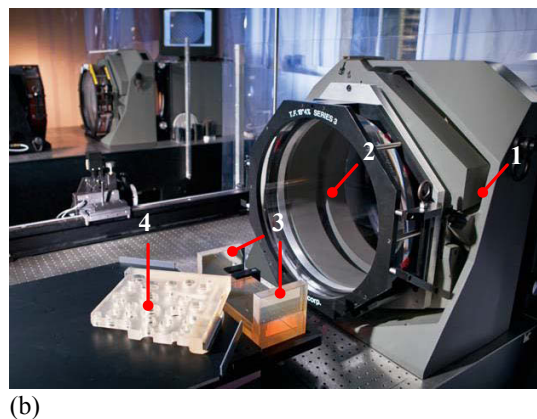
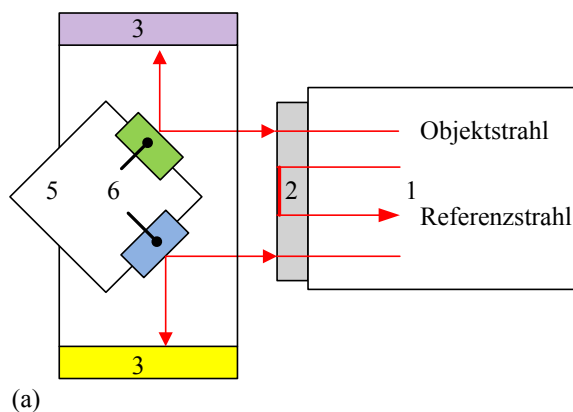


Abbildung 2.10: Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung mittels Etalon-Platten [110]: (a) Prinzipskizze: Draufsicht, (b) Foto des realisierten Messaufbaus von Zygo (1 Zygo-Interferometer, 2 Referenzspiegel, 3 Etalon-Platten, 4 Messobjekt, 5 Raumspiegelecke der NMM-1, 6 x- und y-Spiegel der Spiegelecke)



Durch diese doppelte Reflexion interferieren die Strahlen mit dem Referenzspiegel des Fizeau-Interferometers und die Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Spiegelflächen der Raumspiegelecke können bestimmt werden [45, 103].

Die Etalon-Platten sind in der Herstellung sehr aufwendig und müssen im Montageprozess zeitaufwändig justiert werden. Die Parallelitätsabweichungen der Etalon-Platten gehen direkt in die Winkelmessabweichung ein und müssen berücksichtigt werden. Außerdem spiegeln sich sowohl die Formabweichungen der Referenzfläche des Fizeau-Interferometers als auch die Formabweichungen der Spiegelflächen der Etalon-Platten als systematische Abweichung wider. Deshalb sollten die Parallelität der beiden Spiegelflächen der Etalon-Platten, die Referenzfläche des Interferometers und die Spiegelflächen der Etalon-Platten vorher genau vermessen werden.

### In-Situ-Orthogonalitätsmessung mittels NPL-Tasters

Zur Messung der Orthogonalitätsabweichungen der Raumspiegelecke im eingebauten Zustand wurde am Institut für PMS ein In-situ-Messverfahren angewendet. Dabei wird die 90°-Winkelabweichung zwischen dem x- und dem y-Spiegel mit Hilfe eines allseitig verspiegelten Zerodurwürfels hoher Güte mit einem 3-D-Mikrotaster von NPL (*National Physical Laboratory, UK*) erfasst [33] (vgl. Abbildung 2.11). Das Messverfahren nach Ruijl [72] beruht auf der Tatsache, dass die Innenwinkelsumme eines Vierecks  $2\pi$  beträgt. Zur Messung wird der Zerodurwürfel so auf der Spiegelecke platziert, dass die Würfelflächen weitestgehend parallel zu den Spiegelflächen der Spiegelecke ausgerichtet sind. Eine präzise Ausrichtung ist bei diesem Messverfahren nicht erforderlich. Anschließend werden die Würfelflächen mit dem NPL-Taster linienartig abgescannt. Als Antastelement wirkt eine Rubinkugel mit 0,3 mm Durchmesser.

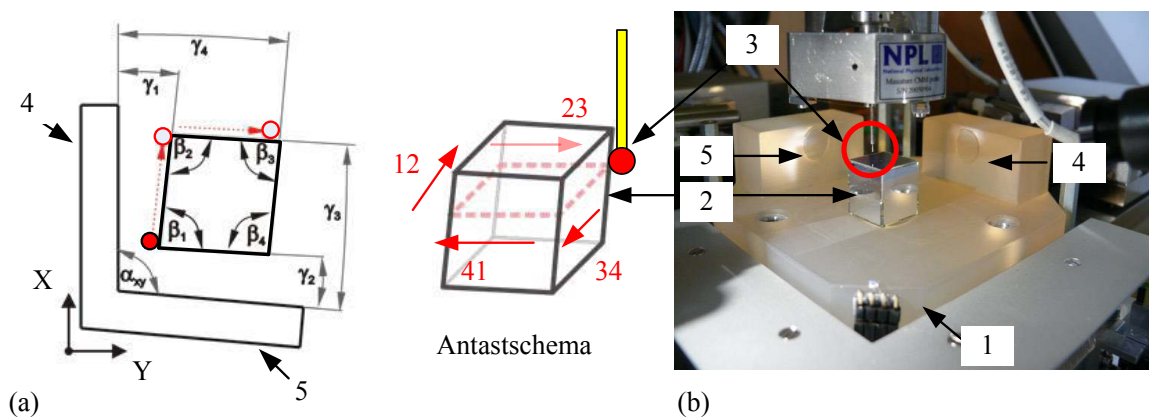


Abbildung 2.11: In-situ-Messung der 90°-Winkelabweichung zwischen dem x- und dem y-Spiegel [33]: (a) Schematische Darstellung der taktilen Antastung, (b) Foto des realisierten Messaufbaus in der NMM-1 mit dem NPL-Taster (1 Raumspiegelecke der NMM-1, 2 Zerodurwürfel, 3 NPL-Taster, 4 x-Spiegel der Raumspiegelecke, 5 y-Spiegel der Raumspiegelecke)

Aus den so erhaltenen Messwerten kann die Winkellage der Würfelflächen zu den Seitenflächen der Spiegelecke bestimmt werden. Mit der Zusatzinformation über die Innenwinkelsumme wird ein vollständig bestimmtes lineares Gleichungssystem aufgestellt (vgl. Gleichung (2.2)), das die x-, y-Winkelabweichung der Raumspiegelecke der NMM-1 enthält (vgl. Gleichung (2.3)) [33].

$$\begin{aligned}
 \alpha_{xy} &= \beta_1 + \gamma_2 + \gamma_1 \\
 \alpha_{xy} &= \beta_2 + \gamma_3 + \gamma_1 \\
 \alpha_{xy} &= \beta_3 + \gamma_3 + \gamma_4 \\
 \alpha_{xy} &= \beta_4 + \gamma_2 + \gamma_4 \\
 \sum_i \beta_i &= 2\pi
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\alpha_{xy} = \frac{1}{2}(\pi + \sum_k \gamma_k) \tag{2.3}$$

Dabei gilt:  $\beta_{1...4}$  Innenwinkel des Zerodurwürfels

$\gamma_{1...4}$  Scan-Winkel, der durch Abtasten entlang den Würfelflächen gemessen wurde

Aufgrund der Möglichkeit mit der NMM-1 alle Seiten des Würfels anzutasten, muss der Zerodurwürfel einmal um  $90^\circ$  gedreht werden. Alle Parameter zur Bestimmung des Winkels  $\alpha_{xy}$  können daher aus den Messungen in zwei Orientierungen gewonnen werden. Der große Vorteil dieses Messverfahrens beruht darin, dass die Abweichungen der vier Innenwinkel  $\beta$  des Messwürfels überhaupt nicht in die Berechnung von  $\alpha$  eingehen, weil die Summe der Innenwinkel  $\beta$  konstant  $2\pi$  beträgt. Mit diesem Verfahren ist eine Kalibrierung des Winkelfehlers der Spiegelecke jederzeit möglich (In-Situ-Orthogonalitätsmessung).



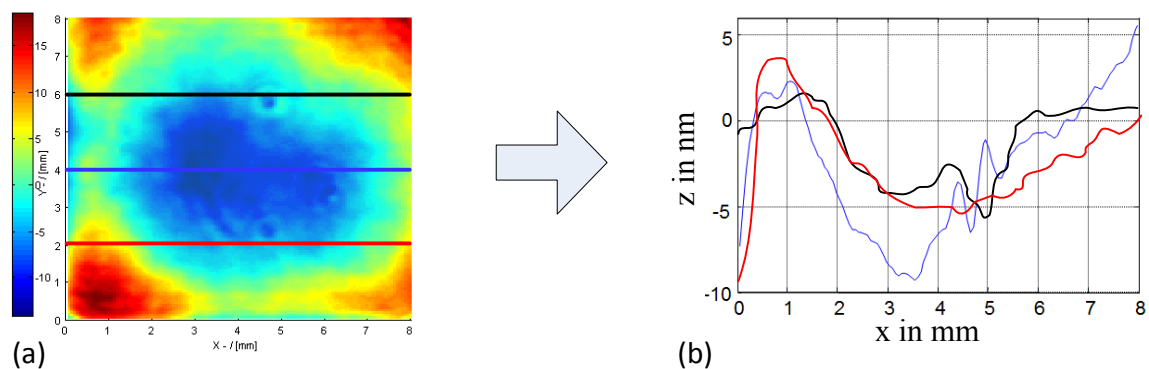


Abbildung 2.12: Oberflächentopographieanalyse des Zerodurwürfels: (a) Topographie einer Fläche des verwendeten Zerodurwürfels, (b) Schnitt entlang einer Scanlinie

Der größte Nachteil dieses Verfahrens besteht allerdings darin, dass die Oberflächentopographie des Würfels einen großen Einfluss auf das Messergebnis haben kann. Der Würfel muss präzise Linie für Linie vermessen werden (vgl. Abbildung 2.12). Die Unsicherheit der Winkelbestimmung kann verbessert werden, in dem mehrere Profillinien zu einer mittleren Linie zusammengefasst oder die auf verschiedenen Linien ermittelten Winkel gemittelt werden. In dem betrachteten Beispiel [33] beträgt die erweiterte Messunsicherheit ( $k=2$ ) unter  $0,12''$ . Im nächsten Schritt sind die  $90^\circ$ -Winkelabweichungen der  $xz$ - und  $yz$ -Spiegel zu bestimmen, und anschließend für die Transformation in kartesische Koordinaten der NPM-Maschine zu verwenden. Die Winkelabweichungen sind dann weiterhin im Abweichungsmodell der NPM-Maschine zu berücksichtigen.

## 2.4 Kapitelzusammenfassung

In Kapitel 2.1 wurde der gegenwärtige Stand der Technik bei der Entwicklung von Raumpiegelecken dargestellt. Es gibt derzeit verschiedene Möglichkeiten, die Oberflächentopographien eines großflächigen Objektes mit Subnanometergenauigkeit zu erfassen und die Orthogonalitätsabweichungen der drei Messspiegelflächen der Raumpiegelecke zu bestimmen.

Der „Drei-Platten-Test“ ist ein häufig verwendetes Verfahren zur Kalibrierung von Referenzspiegeln. Für einen Referenzspiegel mit einem Durchmesser unter 6 Zoll (ca. 152 mm) ist dieses Messverfahren technisch einfach zu realisieren und erfordert einen relativ geringen Justieraufwand. Außerdem sind ein gutes Höhenauflösungsvermögen (Fizeau-Interferometer) und hohe Messgenauigkeit sowie hohe Wiederholbarkeit und geringe Messunsicherheit vorteilhafte Eigenschaften.

Aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und der sehr guten Wiederholbarkeit werden die interferometrischen Topographiemessungen mit dem Stitching-Verfahren als Messmethode für große Flächen favorisiert, die sich zudem durch ihren einfachen Aufbau auszeichnen.

Es wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen zwei senkrecht zueinanderstehenden ebenen Flächen eines Körpers in diesem Kapitel vorgestellt. Diese Verfahren sind nur geeignet für die Messung der Orthogonalitätsabweichung zwischen den x- und y-Spiegelflächen einer Raumspiegelecke. Gegenwärtig ist keine Messmethode bekannt, womit die Orthogonalitätsabweichungen zwischen den xz- und yz-Spiegelflächen einer Raumspiegelecke im eingebauten Zustand ermittelt werden können.

Die Motivation für diese Arbeit ist es, ein hochauflösendes Messsystem für die Bestimmung der Formabweichungen (Topographiemessung der x-, y- und z-Messspiegel und zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen den xy-, xz- und yz-Messspiegelflächen) einer Raumspiegelecke mit hochpräziser Längen- und Winkelmesstechnik zu entwickeln und das Verhalten unter veränderlichen Umweltbedingungen zu untersuchen. Es soll darüber hinaus auch ökonomisch, zuverlässig und vielseitig anwendbar sein.

### 3 Entwicklung von Verfahren zur Messung und Charakterisierung der Messspiegel einer Raumpiegelecke

Der entscheidende Vorteil der NPM-Maschine im Vergleich zu anderen herkömmlichen Koordinatenmessmaschinen besteht darin, dass in der NPM-Maschine das abbesche Komparatorprinzip in allen drei orthogonalen Koordinatenachsen eingehalten wird, um den Einfluss von Kippfehlern erster Ordnung zu minimieren [73]. In der NPM-Maschine schneiden sich die Laserstrahlen von drei orthogonal zueinander, fest angeordneten Interferometern (x-, y- und z-Interferometer) in einem gemeinsamen Punkt, dem sogenannten Abbepunkt (vgl. Abbildung 3.1).

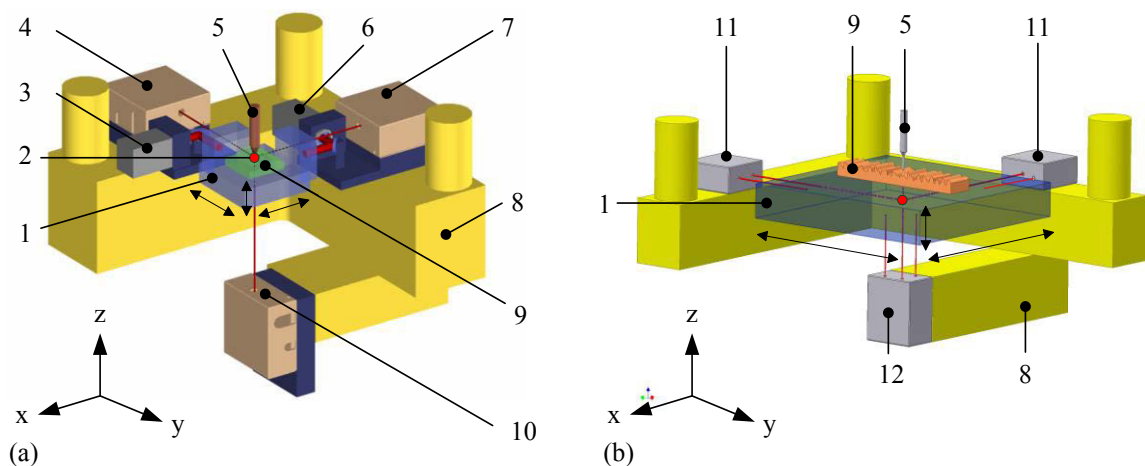


Abbildung 3.1: Modell einer NPM-Maschine ohne Führungs- und Antriebssystem: (a) NMM-1 [48], (b) NPM-200 [3] (1 Raumpiegelecke, 2 Abbepunkt, 3 Nick- und Gierwinkelsensor, 4 y-Interferometer, 5 Tastsystem (Nullindikator), 6 Roll- und Gierwinkelsensor, 7 x-Interferometer, 8 Zerodurrahmen, 9 Messobjekt, 10 z-Interferometer, 11 Zweistrahlinterferometer, 12 Dreistrahlinterferometer)

Der Abbepunkt entspricht gleichzeitig dem Berührungspunkt des Antastsensors mit dem Messobjekt. Durch diese fluchtende Anordnung von zu messender Strecke und Messachse

des Messsystems kann mit der NPM-Maschine im gesamten Messbereich annähernd abbeoffsetfrei gemessen werden [45]. Das Maschinenkoordinatensystem der NPM-Maschine wird durch eine Raumspiegelecke realisiert. Diese trägt das Messobjekt und ist auf einem dreiachsigen Führungssystem befestigt. Zwei Seitenflächen (x- und y-Spiegelfläche) und die Grundfläche (z-Spiegelfläche) der Raumspiegelecke sind nahezu voll verspiegelt, da sie als Reflektor für die Längen- und Winkelmesssysteme dienen. Die Längen- und Winkelmesssysteme sind durch Miniaturinterferometer und/oder Autokollimatoren realisiert worden. Nach dem Einbau der Raumspiegelecke in die NPM-Maschine treffen die Messstrahlen der x-y-z-Interferometer senkrecht auf die x-, y- und z-Spiegelflächen der Messspiegel. Durch das Führungssystem kann sich die Raumspiegelecke sowohl translatorisch (entlang der x-, y- und z-Achse) als auch minimal rotatorisch (um die x-, y- und z-Achse) bewegen. Das Messobjekt steht während der Messung immer in Kontakt mit dem Antastsensor und bewegt sich mit der Raumspiegelecke zusammen. Für die NMM-1 wird die Position der Raumspiegelecke durch die x-y-z-Interferometer hochgenau erfasst. Die Winkelabweichungen (Verkipfung) bei der Positionierung der Raumspiegelecke werden mit zwei Winkelsensoren gemessen (vgl. Abbildung 3.1a). Im Gegensatz zur NMM-1 ist das Längen- und Winkelmesssystem der NPMM-200 zur Detektion der Bewegung in z-Richtung sowie der Verkipfungen um die x- und y-Achse mit einem Dreistrahlinterferometer (vgl. Abbildung 3.1b) anstelle eines Einstrahlinterferometers realisiert. Dabei erfasst ein Strahl (Hauptstrahl) die Änderung der Messposition der Raumspiegelecke in z-Richtung, während die beiden anderen Strahlen (Nebenstrahlen) zusammen mit dem Hauptstrahl für die interferometrische Winkelmessung zuständig sind. Zur Detektion der Bewegung in x- bzw. y-Richtung wird jeweils ein Zweistrahlinterferometer verwendet. Bei diesen erfassen wiederum ein Strahl die Wegänderung in x- bzw. y-Richtung fluchtend zum Abbepunkt und ein Zweiter zusammen mit dem Hauptstrahl eine Drehung um die z-Achse. Die bewusste mehrfache Messung, das heißt zwei Zweistrahlinterferometer und die damit verbundene siebte Achse (vgl. Abbildung 3.1b), wurden gewählt, um die z-Winkel zu mitteln und Rückschlüsse auf die Orthogonalität der verspiegelten Flächen der Raumspiegelecke zueinander ziehen zu können. Da die Unebenheiten der verspiegelten Oberfläche der Raumspiegelecke direkt in das Messergebnis eingehen, müssen diese korrigiert werden. Deswegen muss die Raumspiegelecke der NPM-Maschine bezüglich ihrer topografischen Eigenschaften und ihres thermischen Verhaltens vor dem Einbau in die NPM-Maschine untersucht werden, um daraufhin geeignete Korrekturalgorithmen anwenden zu können [44]. Im Folgenden soll das Funktionsprinzip und der Messaufbau zur Topographiemessung der Raumspiegelecke mit einem Phasenschiebe-Interferometer beschrieben werden.

### 3.1 Aufbau und Funktionsweise des Messsystems

Durch die Geometrie der Raumspiegelecke ist eine in-situ Messung der Oberflächen nicht ohne weiteres möglich. Zudem sind die zu messenden Oberflächen extrem kratzempfindlich. Konventionelle Messsysteme genügen, bedingt durch eingeschränkte Messbereiche, den wachsenden Messanforderungen meist nicht. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit neue Strategien zur Messung der Oberflächen von Raumspiegelecken in verschiedenen Arten und Größen entwickelt, um die daraus gewonnenen Topographiedaten zur Korrektur der Messergebnisse der NPMM zu verwenden. Aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und der höheren Genauigkeit, bzw. der geringeren Messunsicherheit wurde die Phasenschiebe-Interferometrie als Messverfahren für die Messung der Oberflächen der Raumspiegelecken ausgewählt. Ein weiterer großer Vorteil gegenüber punktuell antastenden bzw. linienweise scannenden optischen Messverfahren ist, dass die flächenhafte Topographiemessung von funktionsrelevanten Oberflächen wesentlich schneller durchgeführt werden kann. Damit können die Einflüsse von Umweltänderungen auf das Messergebnis durch kürzere Messzeiten minimiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit entstand der erweiterte und modifizierte Messaufbau zur Topographiemessung von sich in Größe und Materialien unterscheidenden Raumspiegelecken unter Verwendung eines Phasenschiebe-Interferometers. Es wurden zahlreiche messtechnische Untersuchungen von hochpräzisen Planflächen der Raumspiegelecke mit einem GPI-XP Phasenschiebe-Interferometer der Firma Zygo, das standardmäßig über eine 6-Inch-Apertur (ca. 152 mm) verfügt, durchgeführt. Das Zygo-Interferometer verfügt über die geforderte Sub-Nanometer-Auflösung (Höhenauflösung) in z-Richtung. Das Messverfahren wurde in [20, 21] ausführlich erläutert. Der allgemeine Aufbau des Phasenschiebeinterferometers besteht aus einer elektronischen Kamera zur Aufnahme von Interferenzbildern und einer Phasenverschiebungseinrichtung, mit der definierte Gangunterschiedsänderungen vorgenommen werden können. Im Verlauf einer Messung wird die interferometrische Resonatorlänge präzise durch den Einsatz eines Phasenschiebers mit piezoelektrischen Aktuatoren moduliert und die phasengeschobenen Interferogramme werden mit einer CCD-Kamera (Auflösung bei der Bilderfassung: 640x480 Pixeln) aufgenommen. Der Messablauf ist computergesteuert. Ein Mess- und Auswertprogramm MetroPro<sup>®</sup> berechnet und analysiert die erfassten Daten der Topographie der Oberfläche der Messprobe. Das 6 Zoll Modell GPI-XP ist kompakt aufgebaut. Für dieses Phasenschiebe-Interferometer wird eine Genauigkeit von  $\leq \lambda/100$  PV (Drei-Platten-Test), eine PV-Wiederholbarkeit von  $\leq \lambda/300$  ( $2\sigma$ ) und eine RMS-Wiederholbarkeit von  $\leq \lambda/2000$  ( $2\sigma$ ) unter optimalen Messbedingungen angegeben [105].

Einige typische Interferogramme und dazugehörige 3D-Darstellungen der Interferogrammauswertung (rekonstruierte Oberfläche) in MetroPro<sup>®</sup> mit unterschiedlichen Oberflächenformen des Prüflings sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Der Auswertung der erhaltenen Topographien kommt eine besondere Bedeutung zu.

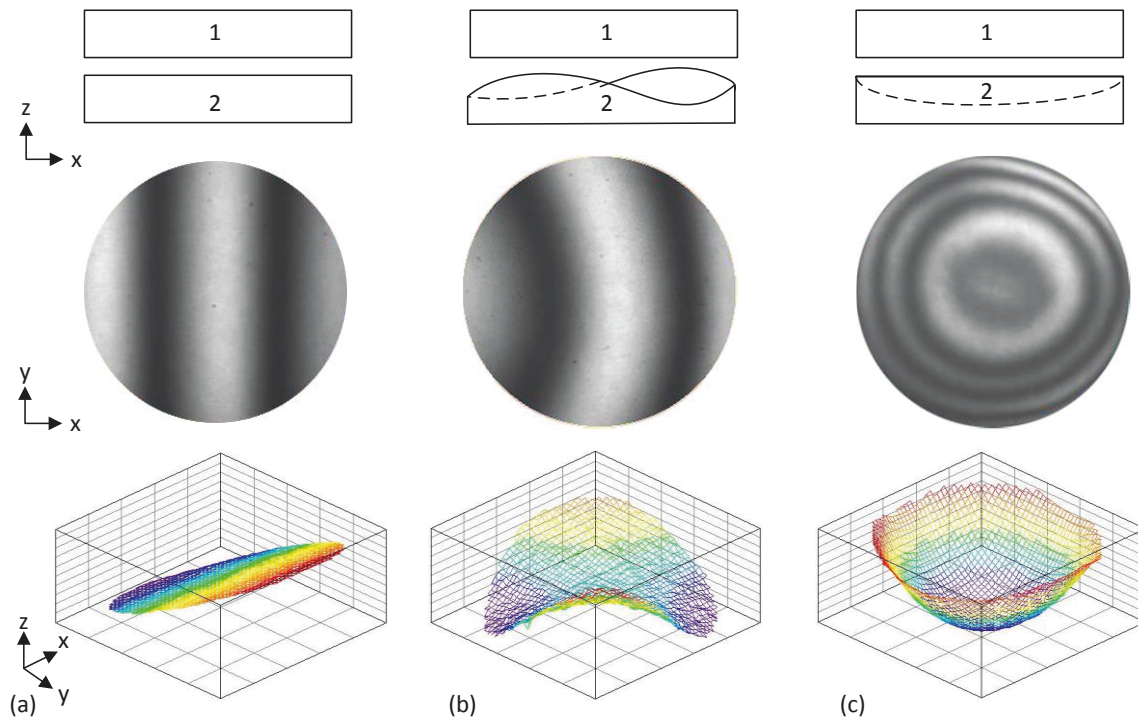


Abbildung 3.2: Typische Interferogramme (Mitte) und dazugehörige 3D-Darstellungen (unten) der Interferogrammauswertungen mit unterschiedlichen Oberflächenformen der Prüflinge: (a) Prüfling mit sehr ebener Oberfläche, (b) Prüfling mit gekrümmter Oberfläche, (c) Prüfling mit leicht gewölbter Oberfläche (1 Referenzplatte eines Phasenschiebeinterferometers, 2 Prüfling); die schematische Darstellung (Draufsicht) einer Relativmessung mit einem Fizeau-Interferometer ist oben dargestellt.

### Topographiemessung der x- und y-Spiegelfläche

Aufgrund der unterschiedlichen Größen von Raumspiegelecken der NPM-Maschinen wurden zwei unterschiedliche topographische Messverfahren durchgeführt. Für die Raumspiegelecken der NMM-1 in verschiedenen Design-Varianten, für welche die Größen der Messspiegelflächen 25 mm x 25 mm für den z-Spiegel und 25 mm x 5 mm für x- und y-Spiegel mindestens betragen, wurde der in Abbildung 3.3 dargestellte Messaufbau untersucht. Bei diesem Messaufbau befindet sich die gesamte zu messende Spiegelfläche der Raumspiegelecke innerhalb des Messfelds des Phasenschiebe-Interferometers (6 Zoll Referenzspiegel). Deswegen wurde die Topographiemessung mit dem Aufbau ohne weiteres Zubehör direkt durchgeführt. Die funktionsrelevanten Bereiche der Spiegelfläche werden softwareseitig interaktiv in den Messdaten (Interferogrammen) markiert.

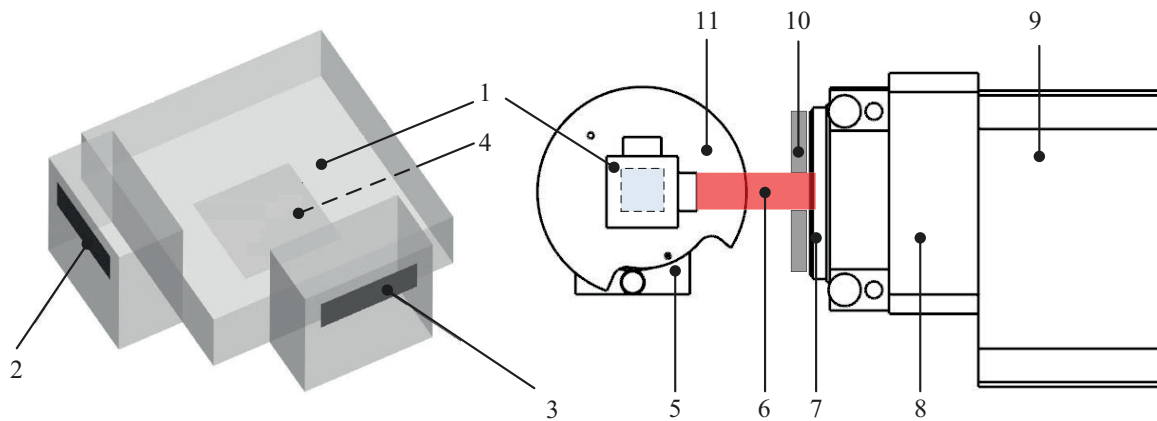


Abbildung 3.3: CAD-Modell des Messaufbaus (Draufsicht) zum Vermessen der x- / y-Spiegelfläche der Raumspiegel der NMM-1 mittels Phasenschiebe-Interferometers mit Erläuterung der wesentlichen Komponenten (1 Raumspiegelecke aus BK 7 mit angesprengten Seitenspiegeln, 2 x-Messspiegel, 3 y-Messspiegel, 4 z-Messspiegel, 5 Justage, 6 Laserstrahl, 7 Referenzspiegel, 8 Phasenschieber, 9 Phasenschiebe-Interferometer, 10 Blende, 11 Trägerplatte)

Für die Raumspiegelecke der NPMM-200 betragen die Größen der Messspiegelflächen 225 mm x 225 mm für den z-Spiegel und 225 mm x 25 mm für die x- und y-Spiegel. Damit sind die zu messenden Oberflächen größer als das Messfeld des Phasenschiebe-Interferometers (6 Zoll Referenzspiegel). Der gesamte Messvorgang wird daher in Einzelmessungen aufgeteilt, wobei die Raumspiegelecke zwischen den Einzelmessungen relativ zur Apertur des Phasenschiebe-Interferometers jeweils so positioniert wird, dass am Ende des kompletten Messvorgangs der gesamte Messbereich in Form von sich überlappenden Teilmessbereichen erfasst ist.

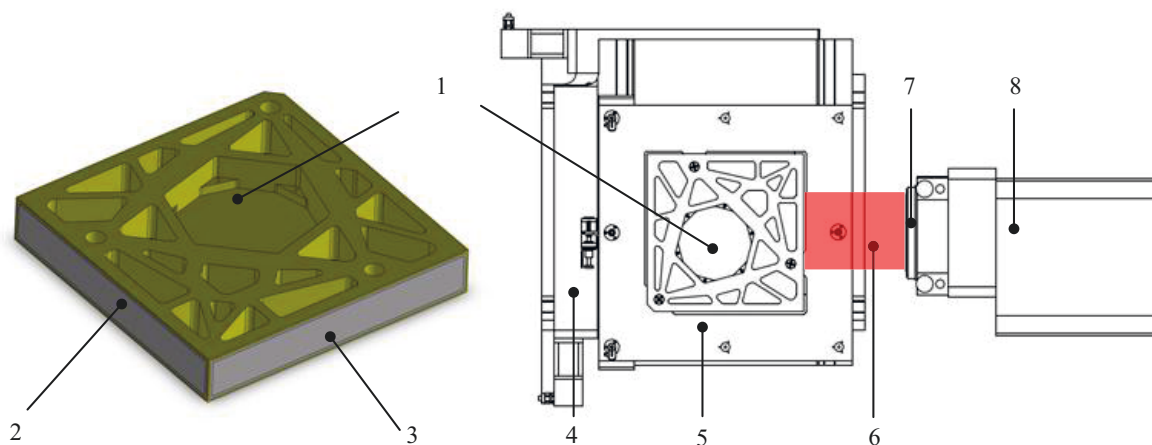


Abbildung 3.4: CAD-Modell des Messaufbaus (Draufsicht) zum Vermessen der x- / y-Spiegelfläche der Raumspiegel der NPMM-200 mittels Phasenschiebe-Interferometers mit Erläuterung der wesentlichen Komponenten (1 Raumspiegelecke, 2 x-Messspiegel, 3 y-Messspiegel, 4 XY-Verschiebetisch, 5 Trägerplatte der Raumspiegelecke mit Justierfunktion, 6 Laserstrahl, 7 Referenzspiegel, 8 Phasenschiebe-Interferometer)

Dazu wird ein hochpräziser XY-Verschietisch verwendet. Die Teilmessbereiche werden dann softwareseitig mithilfe von Optimierungsrechnungen zusammengefasst, um die gesamte Spiegeltopographie zu rekonstruieren. Dieses Vorgehen wird als Subapertur-Stitching (vgl. Kapitel 3.5) bezeichnet. Dieses Verfahren ist an und für sich bekannt und beispielsweise ausführlich beschrieben in [10–13]. Für die NPM-200-Raumspiegelecke sind Verfahrwege bis 350 mm jeweils in x- und y-Richtung erforderlich. Der prinzipielle Messaufbau ist in Abbildung 3.4 skizziert.

### Topographiemessung der z-Spiegelfläche

Unter Verwendung eines 90°-Umlenkspiegels (*Mux Cube*) kann das Messsystem auch die z-Spiegelfläche der Raumspiegelecke messen (vgl. Abbildung 3.5).

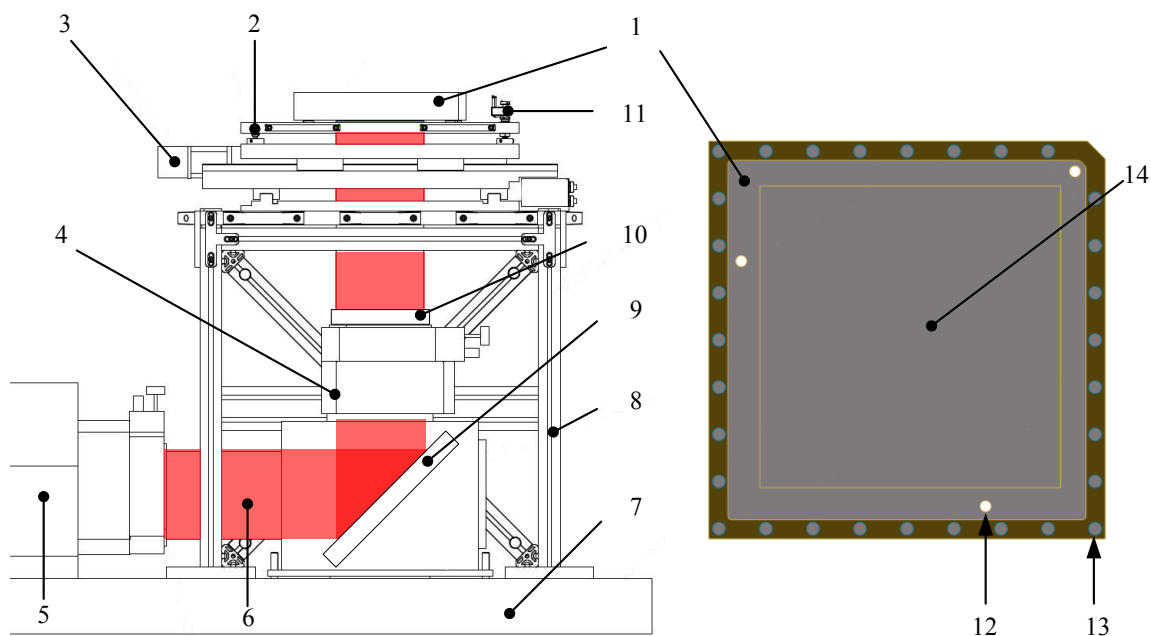


Abbildung 3.5: CAD-Modell des Messaufbaus (Seitenansicht) zum Vermessen der z-Spiegelfläche der Raumspiegel der NPM-200 mittels Phasenschiebe-Interferometers mit Erläuterung der wesentlichen Komponenten (1 Raumspiegelecke, 2 Trägerplatte der Raumspiegelecke mit Justierfunktion, 3 XY-Tisch, 4 elektronische Phasenschieber, 5 Phasenschiebe-Interferometer, 6 Laserstrahl, 7 optischer Tisch, 8 Untergestell, 9 90°-Umlenkspiegel, 10 Referenzspiegel, 11 Picomotor, 12 Befestigungsbohrungen, 13 Punkte als „Stitching-Marken“, 14 z-Messspiegel)

Der Laserstrahl wird mittels des Umlenkspiegels um exakt 90 Grad abgelenkt und die Topographiemessung der verspiegelten z-Fläche durchgeführt. Bei diesem Aufbau wurden der Phasenschieber und der Referenzspiegel in Strahlrichtung nach dem Umlenkspiegel montiert. Damit wird erreicht, dass die Oberflächentopographie des Umlenkspiegels die Messung nicht beeinflusst. Ein großer Vorteil des Messaufbaus liegt darin, dass das Messsystem nicht nur die x- und y-Spiegel (horizontale Lage) sondern auch den z-Spiegel (vertikale Lage) der Raumspiegelecke durch Umschalten des Umlenkspiegels vermessen



kann. Die Raumspiegelecke der NPM-Maschine lagert auf einer Dreipunktauflage, welche der Auflage im eingebauten Zustand entspricht. Wie bei der Topographiemessung der x- und y-Spiegelfläche der Raumspiegelecke der NMM-1, befindet sich in diesem Fall die gesamte, zu vermessende z-Spiegelfläche innerhalb des Messfelds des Interferometers. Deshalb konnte die z-Spiegelfläche mit diesem Aufbau direkt gemessen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass der Durchmesser des Referenzspiegels (ca. 150 mm Durchmesser) nur ausschnittsweise Messungen der Topographie der verspiegelten z-Fläche mit einer Größe von 300 mm x 300 mm zulässt und der gesamte Messbereich auf diese Weise nicht direkt erfasst werden kann, erfolgt die Erfassung der Oberfläche wie schon bei den x- und y-Spiegeln der NPM-200 ebenfalls mittels des Stitching-Verfahrens.

## 3.2 Charakterisierung der Topographie durch Rauheitskennwerte

Für die Topographiemessung sind der PV-Wert (*Peak to Valley Value*) und der RMS-Wert (*Root Mean Square Value*) (DIN ISO 10110-5 [23]) von Bedeutung, um die Qualität einer glatten Oberfläche zu bewerten. Der PV-Wert ist der Abstand zwischen dem höchsten ( $R_p$  - größte positive Abweichung von der Idealform) und dem niedrigsten Punkt ( $R_v$  - größte negative Abweichung von der Idealform) des Oberflächenprofils innerhalb der Bezugsstrecke. Er entspricht der Differenz zwischen Bezugsprofil und Grundprofil [107].

$$PV = |R_p - R_v| \quad (3.1)$$

Ein sehr kleiner PV-Wert lässt auf eine hohe Ebenheit einer Oberfläche schließen. Im Umkehrschluss bedeutet ein hoher PV-Wert jedoch nicht zwangsläufig, dass eine durchweg raue Oberfläche gemessen wurde. Bereits ein winziger Defektpunkt (Staub) einer ansonsten glatten Oberfläche führt zu einem großen PV-Wert. Abbildung 3.6a zeigt zwei Fälle mit gleichem PV-Wert obwohl die linke dargestellte Fläche im Mittel eine deutlich rauere Oberfläche aufweist. In der Regel reicht die alleinige Verwendung des PV-Werts zur Beurteilung einer optischen Oberfläche nicht aus, so dass weitere Kriterien wie zum Beispiel der RMS-Wert herangezogen werden müssen.

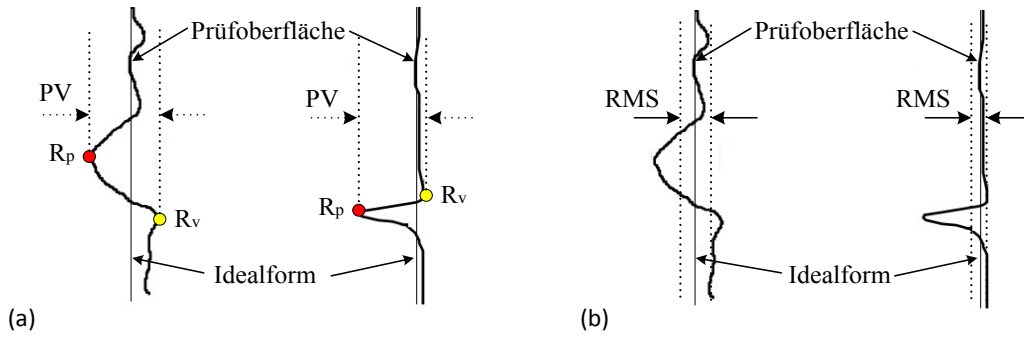


Abbildung 3.6: Darstellung von PV- und RMS-Wert (Schnitt-Darstellung der Oberfläche): (a) PV-Wert (b) RMS-Wert

Der RMS-Wert eines Messdatensatzes (z. B. Profil einer Oberfläche) ist die Wurzel der mittleren, quadratischen Abweichung vom Mittelwert. Der RMS-Wert ( $R_q$ ) für linienhaft messende Tastschnittverfahren ist in der DIN EN ISO 4287 [24] genormt.

$$\text{RMS } (R_q) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i^2} \quad (3.2)$$

In Formel (3.2) ist  $h_i$  der Ordinatenwert und  $n$  die Anzahl der Werte innerhalb einer linienhaften Einzelmessstrecke [107]. Die Berechnung von statistischen Rauheitsparametern flächenhafter Messergebnisse ist in der DIN EN ISO 25178-2 [25] erfasst. Der RMS-Wert ( $S_q$ ) über die Fläche beschreibt die mittlere quadratische Abweichung der Ebenheit der Prüffläche, deren Topographie in Form einer  $m \times n$ -Wertematrix  $z_{ik}$  ( $i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n$ ) vorliegt:

$$\text{RMS } (S_q) = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{n-1} [z(x_i, y_k)]^2} \quad (3.3)$$

Der RMS-Wert beschreibt das quadratische Mittel des Oberflächenstrukturfehlers oder des fortgepflanzten Fehlers relativ zu einer Referenzplatte. Er ist ein flächengewichteter, statistischer Wert. Wenn er für optische Komponenten verwendet wird, stellt er die optische Qualität der gemessenen Platte umfassender dar als der PV-Wert, weil alle Daten der Topographie als Ganzes in die Berechnung einbezogen werden. Der RMS-Wert ist abhängig von Ortsfrequenz, wie in Abbildung 3.6 dargestellt. Deshalb gibt der RMS-Wert im Vergleich zum PV-Wert einen repräsentativeren Hinweis auf die Oberflächenqualität einer Optik.

### 3.3 Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels

Die Systemgenauigkeit einer hochgenauen Topographiemessung der Raumspiegelecke ist von der Qualität der verwendeten Referenzspiegel des Interferometers abhängig [105].

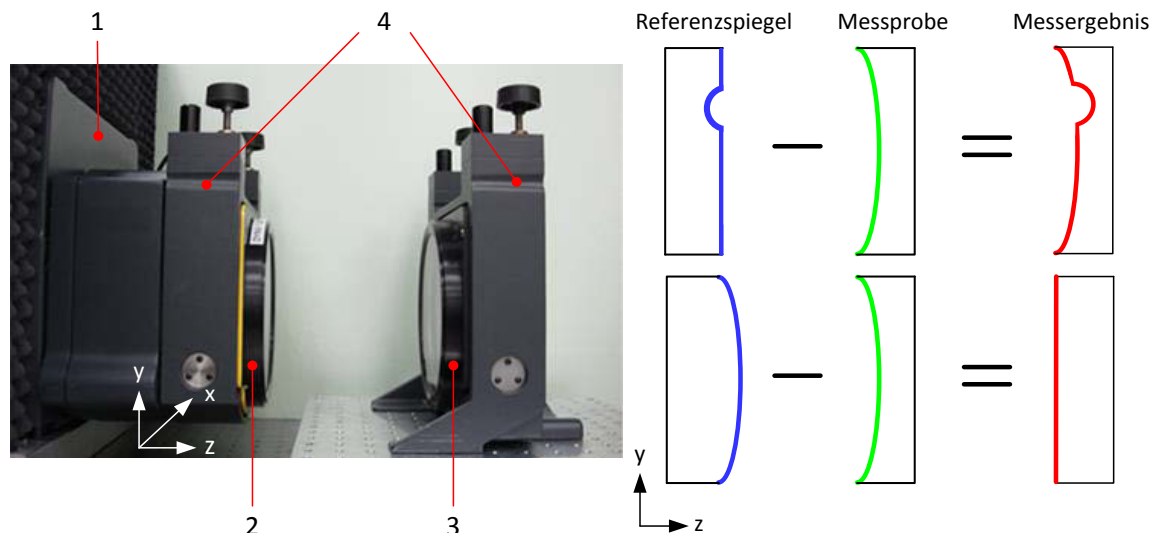


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des relativen Messverfahrens mit einem Zygo-Interferometer zur Bestimmung der Topographie einer Messprobe (1 Zygo-Interferometer, 2 Referenzspiegel, 3 Messprobe, 4 Justierhalter)

Mit einem Phasenschiebe-Interferometer können lediglich Relativmessungen bezüglich einer Referenzfläche durchgeführt werden. Da die Unebenheiten des Referenzspiegels (Referenzplatte) direkt in das Messergebnis eingehen (vgl. Abbildung 3.7), müssen diese im Vorfeld durch eine absolute Kalibrierung ermittelt und später zur Korrektur der Raumspiegeleckentopographie verwendet. In Abbildung 3.7 ist beispielhaft ein lokaler Fehler (Defektpunkt) in der Referenzfläche und in der Form der Ebene (Referenzspiegel mit parabolischer Oberfläche) dargestellt. Die Fehler gehen direkt in das Ergebnis ein und verfälschen die gemessenen Messdaten der Oberflächen. Um die Fehler eliminieren zu können, ist eine absolute Kalibrierung des Referenzspiegels notwendig.

Im nächsten Abschnitt werden zwei Methoden zur absoluten Flächenprüfung des Referenzspiegels, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, beschrieben.

#### 3.3.1 Klassischer Drei-Platten-Test

Von J. Schwider und G. Schulz [85] wurde ein Interferenzverfahren zur Absolutprüfung von Planflächennormalen beschrieben, welches die absolute Bestimmung der

Abweichungen einer Plattenoberfläche von einer idealen Ebene gestattet, ohne ein Ebenheitsnormal als Vergleichsebene zu benötigen. Dieses Verfahren wird als sogenannter „Klassischer Drei-Platten-Test“ oder „Standard Drei-Platten-Test“ bezeichnet. Es werden insgesamt drei Platten benötigt. Davon müssen wenigstens zwei transparent (teildurchlässige Beschichtung auf der Referenzoberfläche) sein, da sie typischerweise als Referenzplatten des Interferometers verwendet werden. Wie in Abbildung 3.8 dargestellt, werden die drei Platten paarweise (Platten-Kombinationen: AB, AC, CB) relativ zueinander mit einem Fizeau-Interferometer gemessen. Die Messdaten beinhalten jeweils zentrale Profilschnitte längs der Platten. Aus diesen Profilschnitten werden die absoluten Abweichungen bezüglich einer idealen mathematischen Ebene ermittelt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der klassische Drei-Platten-Test mit dem 6-Zoll-Zygo-Interferometer (Modell: GPI-XP) durchgeführt. Die MetroPro<sup>®</sup>-, „ThreeFlt“-Softwareapplikation wurde verwendet, um die absolute Abweichung einer Testplatte in Bezug auf eine ideale Ebene zu messen. Für den Drei-Platten-Test wurden drei 6-Zoll-Platten (zwei Referenzplatten A und C und eine zu kalibrierende Platte B) der Firma Zygo eingesetzt. Letztere wies eine Formabweichung von unter  $\lambda/20$  auf. Ihre Neigung war in zwei Achsen (Neigungseinstellung von x- und y-Achse) manuell verstellbar, um eine planparallele Ausrichtung bezüglich der Referenzplatte justieren zu können.

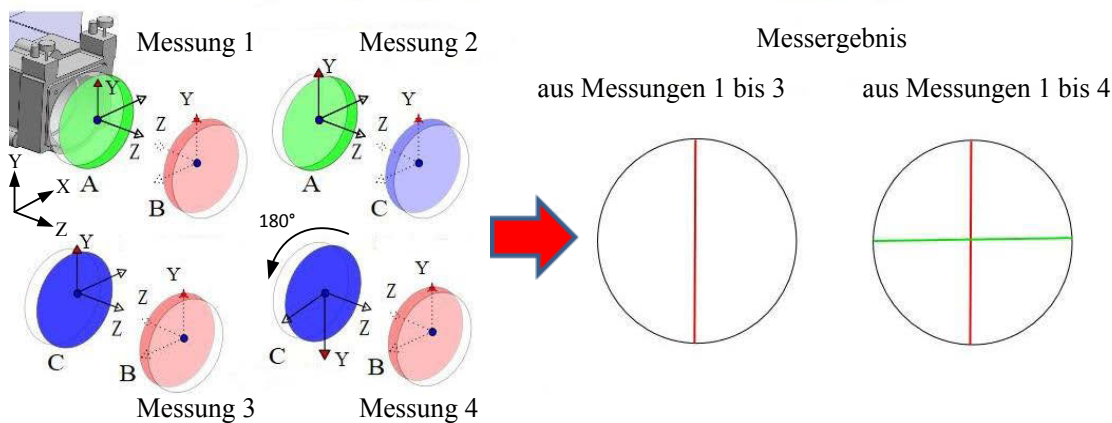


Abbildung 3.8: Messprozedur und Ergebnisse des klassischen Drei-Platten-Tests [100] (Bei der vierten Messung wird die Platte C um  $180^\circ$  bezüglich der Ausgangsposition gedreht und anschließend die Oberfläche ausgerichtet.)

Wie in [109] beschrieben, wurde das Profil der vertikalen und horizontalen Ausrichtung untersucht. Das Drei-Platten-Test-Verfahren erfordert mindestens drei Messungen (vgl. Messungen 1 bis 3 in Abbildung 3.8). Aus den Messdaten wird mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems (vgl. Gleichung (3.4) und (3.5)) der Einfluss der Referenzoberfläche herausgerechnet, um die ursprüngliche Form des Messobjektes zu erhalten. Die

Interferenzaufnahmen  $W_1(x,y)$ ,  $W_2(x,y)$ ,  $W_3(x,y)$  und  $W_4(x,y)$  der vier Messungen setzen sich wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned}
 \text{M1: } W_1(x,y) &= A(x,y) + B(-x,y) \\
 \text{M2: } W_2(x,y) &= A(x,y) + C(-x,y) \\
 \text{M3: } W_3(x,y) &= C(x,y) + B(-x,y) \\
 \text{M4: } W_4(x,y) &= C(-x,-y) + B(-x,y)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

wobei  $A(x,y)$ ,  $B(x,y)$  und  $C(x,y)$  die Abweichungen der drei Oberflächen von den zu prüfenden Platten A, B und C beschreiben.  $A(x,y)$ ,  $B(x,y)$  und  $C(x,y)$  können auch als die Wellenfronten der zu untersuchenden Platten-Oberflächen  $W_A(x,y)$ ,  $W_B(x,y)$  und  $W_C(x,y)$  bezeichnet werden. Bei der Kombination der Platten ist jedoch zu beachten, dass ein System aus drei Gleichungen und vier Unbekannten vorliegt:  $A(x,y)$ ,  $B(-x,y)$ ,  $C(x,y)$ , und  $C(-x,y)$ . Durch die Annahme der Symmetrie bezüglich der y-Achse bekommt das Gleichungssystem genau eine Lösung. Bei den drei Platten muss daher mindestens immer eine Plattenkombination gespiegelte Koordinatenwerte ergeben. Im hier durchgeführten Messszenario wurde daher die Platte C, die in der zweiten Messung die zu messende Platte war, in der dritten Messung als Referenzplatte verwendet (vgl. Abbildung 3.8, Messung 2 und 3). In diesem Fall gilt für die Oberfläche der Platte C,  $C(x,y) = C(-x,y)$ . Wie sich in Formel (3.5) zeigen lässt, existiert auf der y-Achse ( $x = 0$ ) nur eine Lösung:

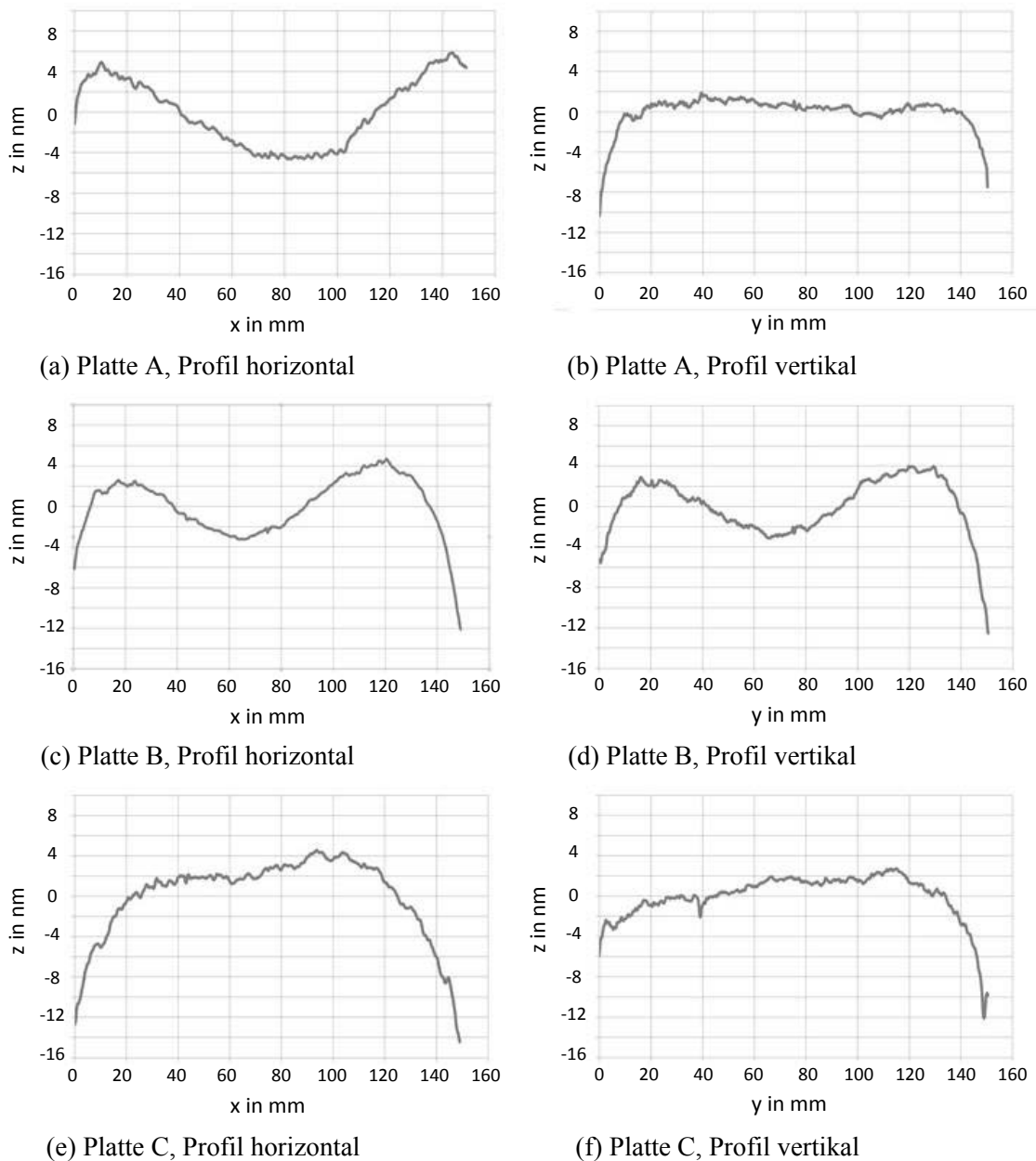
$$\begin{aligned}
 A(0,y) &= \frac{W_1(0,y) + W_2(0,y) - W_3(0,y)}{2} \\
 B(0,y) &= \frac{W_1(0,y) - W_2(0,y) + W_3(0,y)}{2} \\
 C(0,y) &= \frac{-W_1(0,y) + W_2(0,y) + W_3(0,y)}{2}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Die drei Messreihen liefern die Messdaten (PV- und RMS-Werte) über ein Profil entlang der vertikalen Mittelachse des Messobjektes. Ohne die Annahme von Symmetrien können Informationen über die Oberflächen der Platten mittels Relativmessungen von Plattenpaarungen aus lediglich drei Platten nicht gewonnen werden. Um die Messdaten über ein Profil entlang der horizontalen Mittelachse des Messobjektes erfassen zu können, muss zusätzlich zu den drei Kombinationen (AB, AC, CB) noch eine weitere Kombination  $C_{\text{rot}}B$  (vierte Messung M4, vgl. Abbildung 3.8) mit einer um  $180^\circ$  rotierten Platte

durchgeführt werden. Wie sich in Formel (3.6) zeigen lässt, existiert dann auf der x-Achse ( $y = 0$ ), wiederum nur eine Lösung:

$$\begin{aligned}
 A(x, 0) &= \frac{W_1(x, 0) + W_2(x, 0) - W_4(x, 0)}{2} \\
 B(-x, 0) &= \frac{W_1(x, 0) - W_2(x, 0) + W_4(x, 0)}{2} \\
 C(-x, 0) &= \frac{-W_1(x, 0) + W_2(x, 0) + W_4(x, 0)}{2}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Für die Rotation der Platte C lassen sich prinzipiell auch andere Winkel verwenden, um weitere Profillinien durch den Mittelpunkt zu erhalten. Bei der standardmäßig durchgeführten Untersuchung mittels der „ThreeFlt“-Softwareapplikation wurde nur die horizontale und vertikale Ausrichtung des Plattenprofils untersucht.



Phase Avgs: 16

Phase Res: High

Maskengröße: 150 mm Durchmesser

Min Mod Pct: 7

Camera Mode: 640x480 30Hz

Laterale Auflösung : 360 um/Pixel

Abbildung 3.9: Darstellung von Messergebnissen der Profilmessdaten des klassischen Drei-Platten-Tests

In Abbildung 3.9 sind die einzelnen Messergebnisse entlang der horizontalen und vertikalen Mittelachse in einem Bereich von 152 mm für jede der zu untersuchenden Platten dargestellt. Dabei wurden die vier nötigen Messungen für die jeweiligen Plattenkombinationen jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 angegeben.

Tabelle 3.1: Höhenabweichung des Vertikalprofilverlaufs des klassischen Drei-Platten-Tests aus Abbildung 3.9 (bestimmt aus drei Relativmessungen, Messung 1 bis Messung 3)

Bezeichnung der Platte	RMS in nm	PV in nm
A	1,61	12,21
B	2,79	16,51
C	2,35	14,76

Tabelle 3.2: Höhenabweichung des Horizontalprofilverlaufs des klassischen Drei-Platten-Tests aus Abbildung 3.9 (bestimmt aus vier Relativmessungen, Messung 1 bis Messung 4)

Bezeichnung der Platte	RMS in nm	PV in nm
A	3,34	10,47
B	2,92	16,76
C	4,01	18,97

In Abbildung 3.9 ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den anderen Platten die Abweichungen bei Platte B im Horizontal- und Vertikalprofilverlauf annähernd gleich sind.

Um zuverlässigere Aussagen über die Langzeitstabilität des Tests zu erhalten, wurden weiterführende Untersuchungen zur Wiederholbarkeit von Einzelmessungen des klassischen Drei-Platten-Tests durchgeführt. In [105] sind Spezifikationen für die Vergleichbarkeitsuntersuchung beim Drei-Platten-Test angegeben ( $\lambda/100$  PV). Bei der durchgeführten Messdatenanalyse wurde ausschließlich die Platte C als Rotationsplatte verwendet. Um schwankende Umweltbedingungen (Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Vibration) im Labor in die Vergleichbarkeitsbetrachtungen mit einbeziehen zu können, wurden die Messungen zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt. Pro Tag wurden drei Messungen durchgeführt und daraus ein statistischer Mittelwert gebildet. Die zeitlichen Verläufe der Profilmessdaten entlang der horizontalen und vertikalen Mittelachsen der Platten sind in den folgenden Diagrammen dargestellt (vgl. Abbildung 3.10).



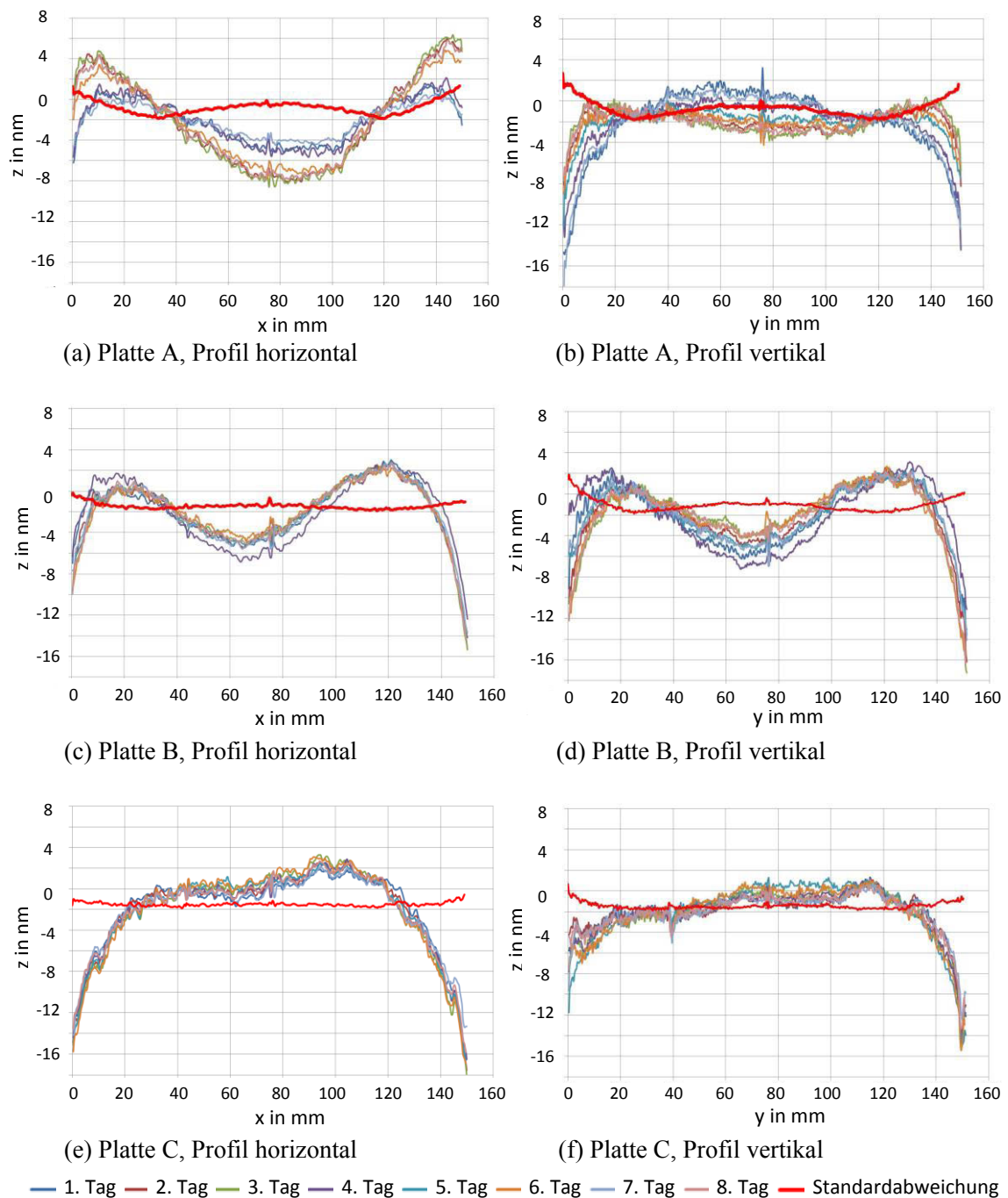


Abbildung 3.10: Vergleichsmessung des klassischen Drei-Platten-Tests über 8 Tage (Vergleich von Messergebnissen der Profilmessdaten)

Der Verlauf der Standardabweichung  $\sigma$  aller, über acht Tage (insgesamt 24 Messprozeduren) gemittelten Messpunkte der Profillinie ist als rote Linie dargestellt (vgl. Abbildung 3.10). Die Ergebnisse der Vergleichbarkeitsmessung sind in Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 angegeben. Dabei werden die RMS- und PV-Werte aus der Standardabweichung des Mittelwertes für eine Mittelung über 960 Einzelmessungen (insgesamt 24 Messprozeduren, 40 Einzelmessungen pro Messprozedur) berechnet. Bei

diesen Messungen wurden eine Vergleichbarkeit von  $\leq 3,22 \text{ nm PV}$  ( $\approx \lambda/200 \text{ PV}$ ) bzw.  $\leq 0,67 \text{ nm RMS}$  für das Horizontalprofil und  $\leq 4,52 \text{ nm PV}$  ( $\approx \lambda/140 \text{ PV}$ ) bzw.  $\leq 0,76 \text{ nm RMS}$  für das Vertikalprofil erreicht. Die experimentell ermittelte Vergleichbarkeit ist also um Faktor 1,4 (Platte C, vertikal) bis 2 (Platte C, horizontal) besser als die in [105] angegebene Spezifikation ( $\lambda/100 \text{ PV}$ ).

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Wiederholbarkeitsmessung des Vertikalprofilverlaufs (bezogen auf die Standardabweichung aller Messpunkte)

Bezeichnung der Platte	RMS in nm	PV in nm
A	0,76	4,52
B	0,58	3,71
C	0,29	2,56

Tabelle 3.4: Ergebnisse der Wiederholbarkeitsmessung des Horizontalprofilverlaufs (bezogen auf die Standardabweichung aller Messpunkte)

Bezeichnung der Platte	RMS in nm	PV in nm
A	0,67	3,22
B	0,28	1,68
C	0,18	1,31

Die Güte der Vergleichbarkeit hängt im Wesentlichen von der Qualität der Beschichtung der Plattenoberfläche ab. Darüber hinaus beeinflusst eine mögliche Defokussierung des Fizeau-Interferometers die Wiederholbarkeit negativ. Bei dem Drei-Platten-Test ist die Messung außerdem von den statischen und dynamischen Umweltbedingungen im Bereich des interferometrischen Resonators abhängig. Um eine gute Stabilität der Messdaten zu gewährleisten, muss die Länge des interferometrischen Resonators möglichst kurz und für alle Messungen möglichst gleich gehalten werden. Bei dieser Untersuchung betrug die Resonatorlänge lediglich 8 mm. Es hat sich gezeigt, dass durch die Anbringung einer Schutzumhüllung die Messbedingungen zu den unterschiedlichen Messzeiten nahezu gleichgeblieben sind. Die Abweichungen der Platteneinbaulage, die beim Einspannen der Platten zwangsläufig entstehen, verschlechtern das Ergebnis der Vergleichbarkeitsuntersuchung. Auf die genaue Positionierung der Platten ist daher vor allem beim Tausch zu achten. Es muss sichergestellt sein, dass die Platten immer optimal und wiederholbar ausgerichtet sind. Einen weiteren Einfluss auf die Vergleichbarkeit haben Veränderungen der eigentlichen Plattenformen, die durch unterschiedliche

mechanische Belastungen der Platte beim Wiedereinbau aufgrund veränderter Einspannkkräfte mittels der Bajonettverbindungen entstehen. Umwelteinflüsse sowie Messabweichungen des Messsystems stellen bei Messungen im Nanometer-Bereich sehr große Störfaktoren dar. Eine detaillierte Analyse der Messabweichungen bezüglich der Messungen des Zygo-Interferometers findet im Kapitel 8 statt.

### 3.3.2 Drei-Platten-Test zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels

Die hochgenaue Topographiemessung der Raumspiegelecke soll mit einem Zygo-Interferometer durchgeführt werden. Zur Korrektur der systematischen Abweichungen des Zygo-Interferometers wurde wiederum die komplette Topographie des Referenzspiegels zunächst hochgenau kalibriert. Die flächenhafte Bestimmung der absoluten Abweichungen von Planflächen aus reinen Relativmessungen zwischen mehreren Planflächen mittels traditioneller Drei-Platten-Test-Verfahren ist nicht möglich. Verfahrensbedingt kann beim traditionellen Drei-Platten-Test nur die absolute Topographie entlang einer einzelnen Linie einer Platte gewonnen werden. An allen anderen Punkten ist keine Aussage über die Topographieabweichungen möglich. J. Schwider und G. Schulz [76] entwickelten eine Methode, mit der zumindest näherungsweise eine flächenhafte Beschreibung der Topographieabweichungen zwischen den Planflächen ermittelt werden kann. Indem jeweils die Platten der Plattenkombinationen des Drei-Platten-Tests mehrfach relativ zueinander um geeignete Winkel gedreht, verschoben und dann in der jeweiligen Lage vermessen werden, entsteht ein Netz von zentrischen und außerzentrischen Linienprofilen. In die Absolutprüfung der Planflächen wird anschließend das komplette Netz von gemessenen Linienprofilen als Näherung für eine flächenhafte Auswertung mit einbezogen. Es sind in der Regel umfangreiche Nachbearbeitungsschritte erforderlich, wie z. B. Interpolation erfasster Wellenaberrationen mittels Zernike-Polynomen, um die Profillinien zu einer Gesamtoberfläche zu fusionieren. Seit 1980 wurden viele unterschiedliche Methoden (erweiterter Drei-Platten-Test) zur absoluten Kalibrierung der gesamten Plattenoberfläche entwickelt. Zu den bekanntesten Verfahren zählen die „Fritz Methode“ (*the Zernike polynomial fitting Method*, 1984) [32], die auf Achsensymmetrie unter Verwendung „gerader und ungerader“ Funktionen beruhende Methode von Ai und Wyant (*method based on further investigating symmetry by using even and odd functions*, 1993) [1], die N-Position-Methode von Evans und Kestner (*the N-Position Method*, 1996) [31], das auf Rotationssymmetrie basierende Verfahren von Küchel (*method based on rotation symmetry*, 2001) [54] und die Spiegelsymmetrie-Methode von Griesmann (*method based on mirror symmetry*, 2006) [41]. Sie alle knüpfen eng an die klassischen Verfahren des Drei-Platten-Tests an.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Untersuchungen zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels nach der Methode von Küchel durchgeführt. Diese Methode basiert auf der Annahme von Achsensymmetrie zur Lösung des obengenannten Problems des klassischen Drei-Platten-Tests. Dieses Verfahren wurde ursprünglich von Ai und Wyant vorgestellt. Die Wellfronten der zu untersuchenden Plattenoberflächen in Symmetriekomponenten  $F(x, y)$  in einem kartesischen Koordinatensystem werden dabei unter der Voraussetzung einer doppelten Achsensymmetrie an den x- und y-Achsen als Linearkombination in vier Funktionsteile (gerade-gerade (*even-even*,  $F_{ee}$ ), gerade-ungerade (*even-odd*,  $F_{eo}$ ), ungerade-gerade (*odd-even*,  $F_{oe}$ ) und ungerade-ungerade (*odd-odd*,  $F_{oo}$ )) zerlegt [1]:

$$F(x, y) = F_{ee} + F_{eo} + F_{oe} + F_{oo} \quad (3.7)$$

Die ersten drei Funktionsteile ( $F_{ee}$ ,  $F_{eo}$ ,  $F_{oe}$ ) der Oberfläche einer Platte können leicht in der klassischen Drei-Platten-Test Konfiguration (vgl. Kapitel 3.3.1) gelöst werden. Zur Ermittlung der ungerade-ungerade Funktionsteile ( $F_{oo}$ ) sind zusätzliche Messungen notwendig. Küchel hat in darauffolgenden Arbeiten die N-Position-Methode von Evans und Kestner mit der Methode von Ai und Wyant kombiniert, um die Vorteile beider Methoden zu vereinen. Küchel hat beide Methoden modifiziert und reduzierte die Rechenlast und die Datenmenge. In diesem Fall ist der Schlüssel zur Lösung des Drei-Platten-Tests die Separierung der Funktionsteile der Plattenoberfläche  $F(x, y)$  in unterschiedliche Achsensymmetrien zur x- und y-Achse. Die ungerade-ungerade Funktionsteile ( $F_{oo}$ ), welche in x- und y-Richtung ungerade sind, können durch kontinuierliche oder inkrementelle Rotation einer Platte um mindestens  $180^\circ$  um die z-Achse aufgelöst werden (Messung 5, vgl. Abbildung 3.11). Unter Einbeziehung der so ermittelten, verschiedenen Symmetriekomponenten können schließlich die gesamten Topographien der zu kalibrierenden Platten vollständig aus den Messdaten berechnet werden.

Um die Residuen zu minimieren, was durch die Methode der kleinsten Quadrate realisierbar ist, wird hier die Drehung der Platte in einer endlichen Anzahl von N Schritten durchgeführt. Der Aufwand wird durch die Minimierung des Azimut-Anteils gegenüber der kompletten Umdrehung der Platte in N Schritten mit definierter Winkelschrittweite (Azimutwinkel)  $\Delta\Phi$  verringert [54].

Diese Methode hat vier wesentliche Vorteile:

- Die Lösung wird durch eine reine Überlagerung der Messdatensätze ohne jegliche Interpolation gewonnen.
- Der Aufwand der Messprozedur wird wesentlich verringert, da nur noch eine halbe Umdrehung der Platte in N Schritten notwendig ist.
- Im Vergleich zu anderen Methoden erfordert diese Methode keinen Wechsel von einem kartesischen Kamerakoordinatensystem in ein Polarkoordinatensystem. Für die Berechnung können die Originaldaten des Zygo-Interferometers direkt verwendet werden.

Der Ablauf der Messprozedur zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels nach der Methode von Küchel ist in Abbildung 3.11 dargestellt. In Erweiterung zum klassischen Drei-Platten-Test (vgl. Abbildung 3.8) wurde die zusätzliche Vermessung der Platte mit einer Rotationswinkelschrittweite  $\Delta\Phi$  von jeweils  $11.25^\circ$  (Platte B) von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  durchgeführt (Messung 5, vgl. Abbildung 3.11). Dadurch wurden in Analogie zu Küchels Ansatz [54] insgesamt 20 Messungen für verschiedene Platten-Kombinationen (M1: AB, M2: AC, M3: CB, M4:  $C^{180^\circ}B$ , M5:  $AB^{11,25^\circ}$ ,  $AB^{22,5^\circ}$ ,  $AB^{33,75^\circ}$ ,  $AB^{45^\circ}$ ,  $AB^{56,25^\circ}$ ,  $AB^{67,5^\circ}$ ,  $AB^{78,75^\circ}$ ,  $AB^{90^\circ}$ ,  $AB^{101,25^\circ}$ ,  $AB^{112,5^\circ}$ ,  $AB^{123,75^\circ}$ ,  $AB^{135^\circ}$ ,  $AB^{146,25^\circ}$ ,  $AB^{157,5^\circ}$ ,  $AB^{168,75^\circ}$  und  $AB^{180^\circ}$ ) durchgeführt.

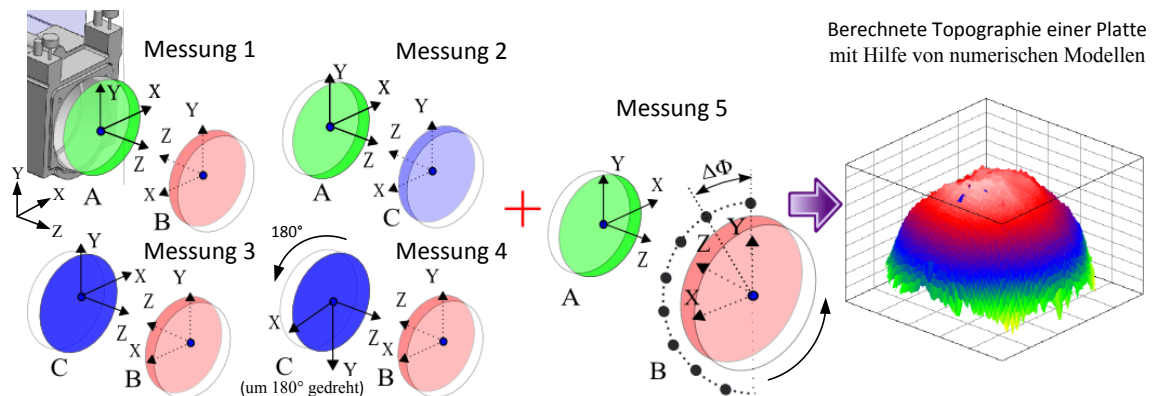


Abbildung 3.11: Messprozedur und Ergebnis zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels nach der praktisch angewandten Methode von Küchel [100]. Bei der letzten Messung wird die Platte B inkrementell mit definierter Winkelschrittweite  $\Delta\Phi$  gedreht und es werden insgesamt 16 Messungen durchgeführt.

Küchel gibt folgende Gleichung zur allgemeinen Berechnung der Wellenfrontfehler an [54]. Diese kann als ein Matrix-Vektor-Produkt geschrieben werden kann:

$$\begin{pmatrix} A(x,y) \\ B(x,y) \\ C(x,y) \end{pmatrix} = \frac{1}{240} * W^T * M \quad (3.8)$$

Dabei repräsentieren die Variablen  $A(x,y)$ ,  $B(x,y)$  und  $C(x,y)$  auf der linken Seite des Gleichungssystems die zu untersuchende Topographie der Platten A, B und C. Die auf der rechten Seite des Gleichungssystems auftretende Matrix  $W^T$  enthält die Koeffizienten des linearen Gleichungssystems und wird deswegen als Koeffizientenmatrix bezeichnet. Die erfassten Messdaten werden in einer Datenmatrix (Spaltenvektor)  $M$  angeordnet. Jede Zeile der Datenmatrix repräsentiert einen gemittelten Messwert aus zehn Messungen einer Messreihe, die mit dem Zygo-Interferometer gewonnen wurden. Die entsprechenden Einträge (Komponenten) der beiden Ausgangsmatrizen [54] werden in Gleichung (3.9) detailliert beschrieben.

$$W = \begin{pmatrix} 90 & -6 & -54 \\ 30 & 86 & -26 \\ 30 & 46 & 14 \\ -30 & -6 & -54 \\ 90 & -54 & -6 \\ 30 & -26 & 86 \\ 30 & 14 & 46 \\ -30 & -54 & -6 \\ -45 & 13 & 77 \\ -45 & 77 & 13 \\ 15 & -23 & -7 \\ 15 & -7 & -23 \\ -45 & -7 & -23 \\ 15 & 77 & 13 \\ -45 & -23 & -7 \\ 15 & 13 & 77 \\ 60 & 60 & 60 \\ -60 & -60 & -60 \\ -60 & -60 & -60 \\ 60 & 60 & 60 \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} W_1(x,y) \\ W_1(-x,y) \\ W_1(x,-y) \\ W_1(-x,-y) \\ W_2(x,y) \\ W_2(-x,y) \\ W_2(x,-y) \\ W_2(-x,-y) \\ W_3(x,y) \\ W_3(-x,y) \\ W_3(x,-y) \\ W_3(-x,-y) \\ W_4(x,y) \\ W_4(x,-y) \\ W_4(-x,y) \\ W_4(-x,-y) \\ W_5(x,y) \\ W_5(-x,y) \\ W_5(x,-y) \\ W_5(-x,-y) \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Schließlich wird die Gesamttopographie der zu kalibrierenden Platten A, B und C aus diesen Gewichtungsfaktoren der linearen Gleichungssysteme und den Messdatensätzen des Zygo-Interferometers berechnet.

Die fünf Messdatensätze sind:

$$\begin{aligned}
 \text{M1: } W_1(x, y) &= A(x, y) + B(-x, y) \\
 \text{M2: } W_2(x, y) &= A(x, y) + C(-x, y) \\
 \text{M3: } W_3(x, y) &= C(x, y) + B(-x, y) \\
 \text{M4: } W_4(x, y) &= C(-x, -y) + B(-x, y) \\
 \text{M5: } W_5(x, y) &= \frac{1}{16} \sum_{k=1}^{16} \{A(x, y) + [B(-x, y)]^{k \cdot \Delta\Phi}\} \\
 &= A(x, y) + \frac{1}{16} \sum_{k=1}^{16} [B(-x, y)]^{k \cdot \Delta\Phi}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Dabei bezeichnet  $k$  die Anzahl der Umdrehungen der Platte B und  $\Delta\Phi$  den Schrittwinkel. Die Konfiguration der ersten vier Messungen entspricht dem klassischen Drei-Platten-Test. Die vier nötigen Messungen für die jeweiligen Plattenkombinationen wurden jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt. Die fünfte Messung wird durch Mehrfachmessungen mit verschiedenen Drehwinkeln realisiert. Die Platte B wird 16 Mal durch einen Schrittwinkel  $\Delta\Phi$  von  $11.25^\circ$  auf der z-Achse relativ zu Platte A um eine halbe Drehung (hier  $k = 16$  und  $k \cdot \Delta\Phi = 180^\circ$ ) rotiert und gemessen. Bei der Berechnung des Ergebnisses der fünften Messung erfolgt die Durchschnittsberechnung für alle 16 Messungen, wie in Formel (3.10) beschrieben. Die erforderlichen Spiegelungsoperationen werden rein rechnerisch durchgeführt. Danach können die Oberflächen  $A(x, y)$ ,  $B(x, y)$  und  $C(x, y)$  aus den Linearkombinationen aller möglichen Symmetriekonfigurationen extrahiert werden. Die Gewichtungsfaktoren der Koeffizientenmatrix der linearen Gleichungssysteme sind so gewählt, dass das statistische Rauschen minimiert wird [54].

Die berechneten Ergebnisse sind in Abbildung 3.12 einerseits als Falschfarben-Darstellung, andererseits als 3D-Darstellung abgebildet. Die experimentell ermittelten Formabweichungen der zu kalibrierenden Referenzplatten liegen innerhalb der angegebenen Spezifikation ( $\lambda/20$  PV) [105] des Herstellers. Die zugehörigen erweiterten Messunsicherheiten  $U$  jeder einzelnen Messreihe wurden aus den Standardmessunsicherheiten und den Erweiterungsfaktoren  $k$  berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.5 angegeben. Der Gesamtbetrag der erweiterten Messunsicherheit für die komplette Messprozedur beträgt 1,22 nm über den vollen Durchmesser der Platte von 150 mm (bezüglich der euklidischen Norm). Da die Rotation der Platte für die 5. Messung

(M<sub>5</sub>) im Experiment manuell erfolgt ist, entstanden geringfügige Verkipnungen der Platte. Das führte zu relativ schwankenden/instabilen Messwerten.

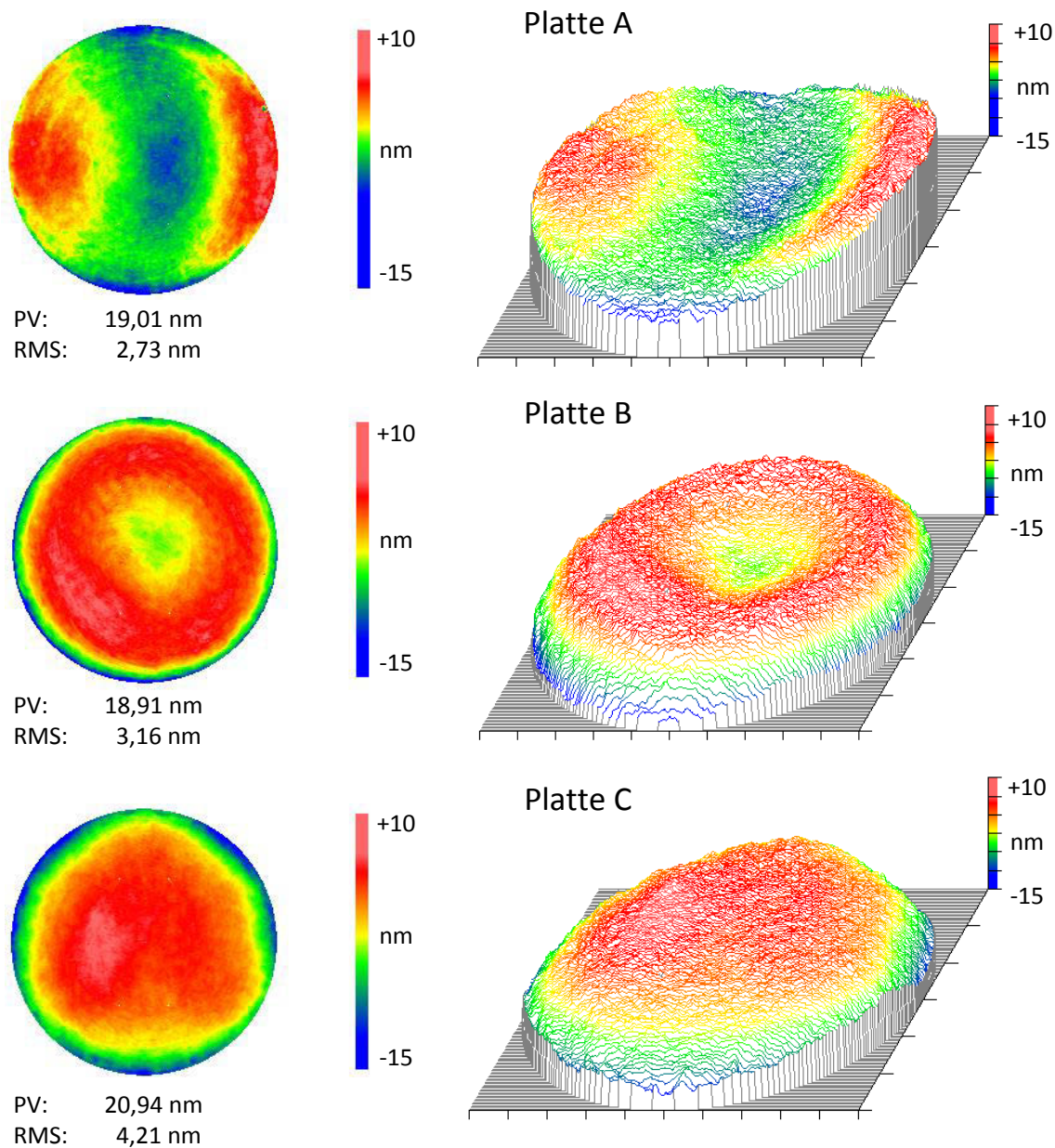


Abbildung 3.12: Darstellung von Messergebnissen des Drei-Platten-Tests zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels

Aus diesem Grund ist die erweiterte Messunsicherheit aus der fünften Messreihe in diesem Fall größer als bei den restlichen Messreihen. Um diesen Einfluss zu minimieren, ist es sinnvoll die Anzahl der Wiederholungen zu erhöhen, um daraus einen Mittelwert aller Messpositionen zu bilden.



Tabelle 3.5: Erweiterte Messunsicherheit  $U$  jeder einzelnen Messreihe ( $k = 2$ )

Messreihe (Platten-Kombination)	M <sub>1</sub> (AB)	M <sub>2</sub> (AC)	M <sub>3</sub> (CB)	M <sub>4</sub> (C <sup>180°</sup> B)	M <sub>5</sub> (AB <sub>rot</sub> )	M <sub>ges</sub> (gesamte Prozedur)
$U$ in nm	0,47	0,47	0,39	0,49	0,81	1,22

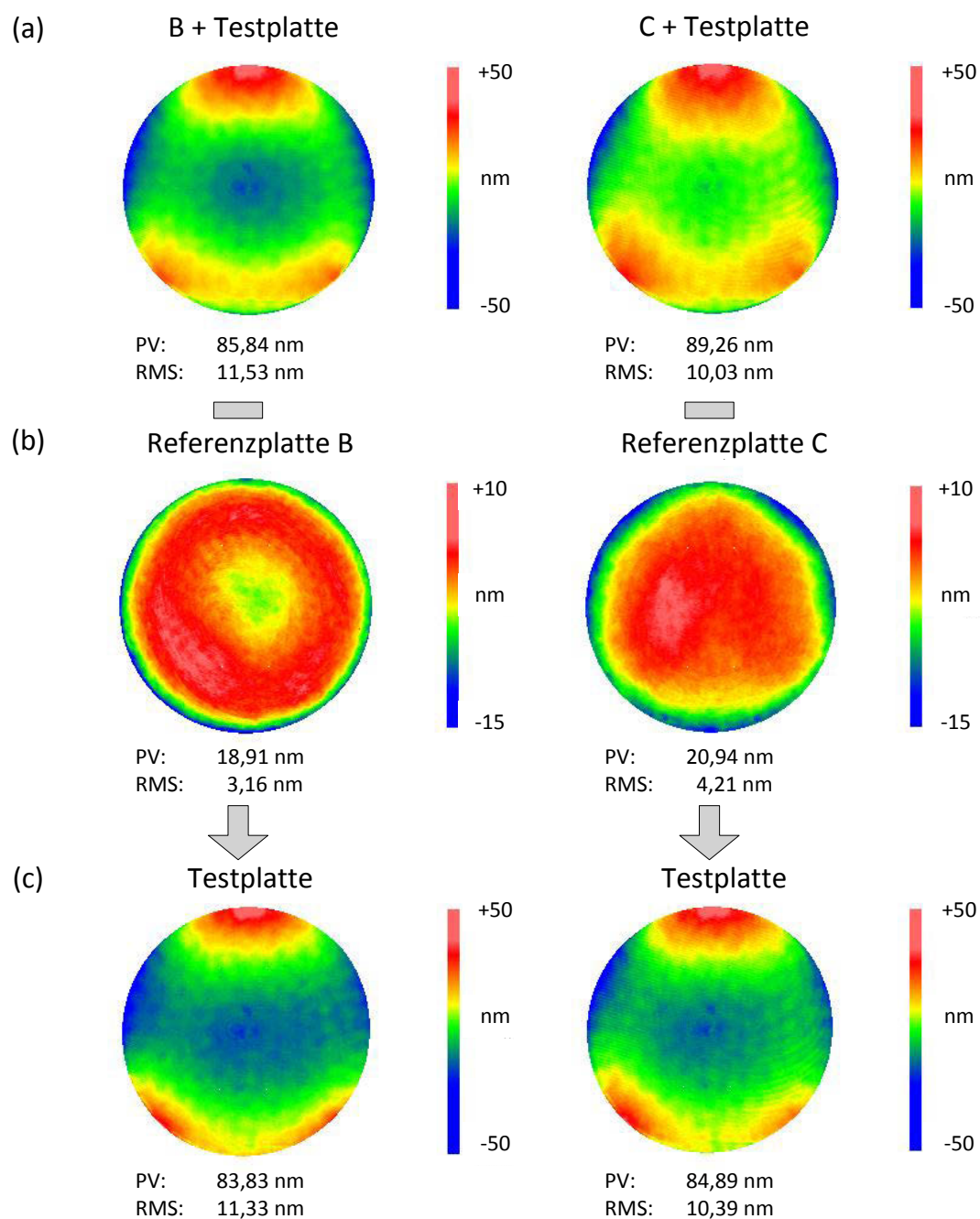


Abbildung 3.13: Vergleich der Messergebnisse bei Verwendung unterschiedlicher Referenzplatten mit bekannter Topographie, die durch Drei-Platten-Tests zur flächenhaften Absolutprüfung kalibriert wurden

In Abbildung 3.13 sind zur Veranschaulichung die Messergebnisse der Topographie einer untersuchten Testplatte (Durchmesser  $\varnothing = 150$  mm, Formabweichung der Oberfläche  $< \lambda/4$  PV bei 633 nm, Zerodur<sup>®</sup>) mit und ohne Berücksichtigung der Formabweichung der verwendeten unterschiedlichen Referenzplatten (Platten B und C), die durch den Drei-Platten-Test zur flächenhaften Absolutprüfung kalibriert wurden, dargestellt. Die Beispiele zeigen, dass bei Kenntnis der Formabweichung der Referenzflächen eine gute Korrektur der Messergebnisse möglich ist. In Abbildung 3.13c sind die Ergebnisse nach der Korrektur der Formabweichungen der verwendeten Referenzflächen gegenübergestellt. Die Differenz beider PV-Werte und die Differenz beider RMS-Werte beträgt nach der Korrektur jeweils etwa 1 nm.

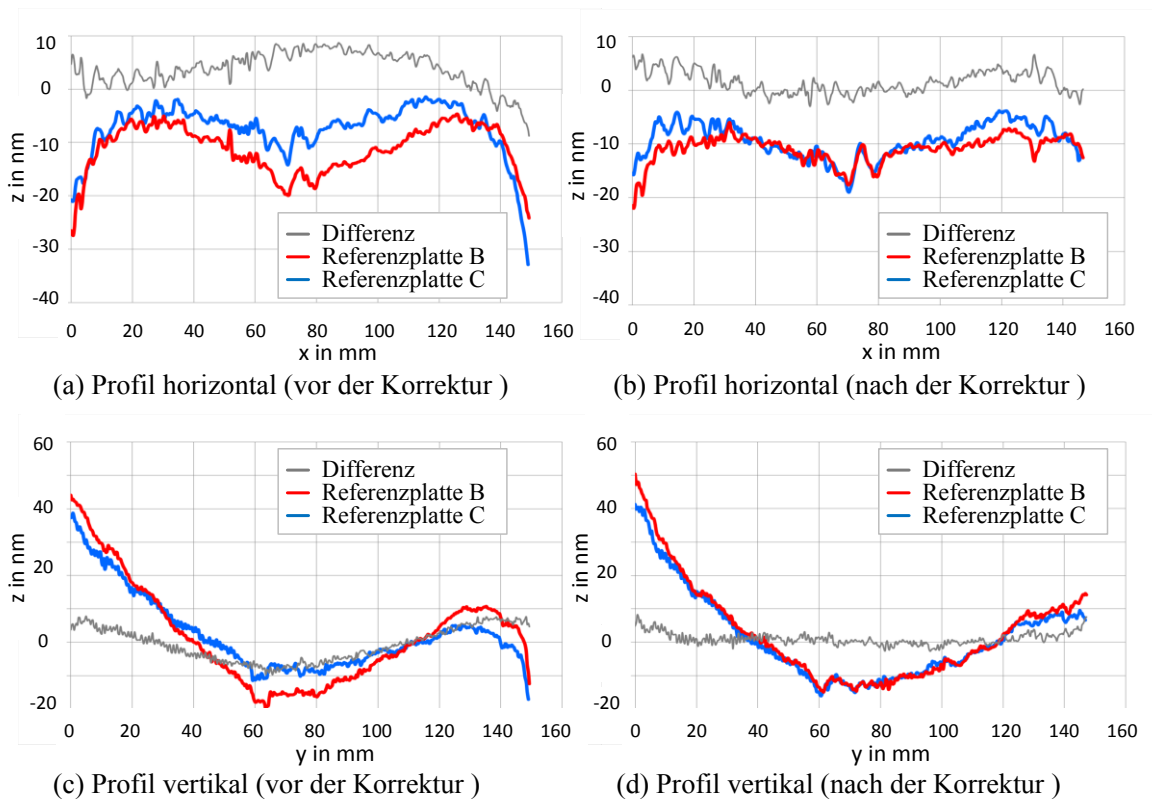


Abbildung 3.14: Darstellung der Profileverläufe von Messergebnissen der Testplatte (Durchmesser  $\varnothing = 150$  mm, Zerodur<sup>®</sup>) bei Verwendung unterschiedlicher Referenzplatten (Platten B und C) ohne/mit Korrektur systematischer Messabweichungen, entstehend durch die Formabweichungen der Referenzfläche (rote Kurve - gemessen durch Referenzplatte B, blaue Kurve - gemessen durch Referenzplatte C, graue Kurve – Verlauf der Differenzen)

Um den Einfluss der Topographie (Formabweichung der Referenzfläche) der Referenzplatten zu verdeutlichen, sind in Abbildung 3.14 sowohl die horizontalen (obere Seite) als auch die vertikalen Profilverläufe (untere Seite) der beiden Ergebnisse bei Verwendung unterschiedlicher Referenzplatten ohne (linke Seite)/mit (rechte Seite) Korrektur systematischer Messabweichungen übereinandergelegt und als Differenz

dargestellt worden. Es lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Ergebnissen nach der Korrektur beobachten. In diesem Fall hat sich die Abweichung der Differenzkurve der vertikalen Verläufe von 5,05 nm auf 1,78 nm RMS verbessert, im Mittelbereich von 80 % des Durchmessers (ca. 120 mm) sogar von 4,02 nm auf 1,11 nm RMS. Entsprechend hat sich die Abweichung der Differenzkurve der horizontalen Verläufe von 3,31 nm auf 2,11 nm RMS verbessert, im Mittelbereich von 80 % des Durchmessers von 2,21 nm auf 1,95 nm RMS. Die erzielten Ergebnisse rechtfertigen den Einsatz der absoluten Kalibrierung der Referenzplatte des Zygo-Interferometers.

Durch Anwendung dieses Algorithmus werden die Restabweichungen im Endergebnis minimiert. Die entstehenden Messabweichungen können in zwei Gruppen aufgeteilt werden, in systematische und zufällige Messabweichungen. Die systematischen Abweichungen sind aufgrund der endlichen Anzahl von Winkelpositionen für die Mittelung während der "Drehmessung" entstanden. Die zufälligen Abweichungen sind durch das Rauschen in den Originalmessdaten, das von der Qualität der interferometrischen Phasenmessungen abhängt, verursacht worden. Die Güte der Messdaten aus der interferometrischen Phasenmessung hängt besonders von den verwendeten Auswertelgorithmen zur Messdatenextraktion und den Umweltbedingungen im Messlabor ab [54]. Eine detaillierte Analyse der Messabweichungen bezüglich der Verfahren zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels findet im Kapitel 8 statt.

Durch den beschriebenen Kalibriervorgang wird die vollständige Oberflächentopographie der Referenzplatte des Fizeau-Interferometers, die für die messtechnische Charakterisierung der Raumspiegelecken verwendet werden soll, in horizontaler Messrichtung hochpräzise bestimmt.

### **3.4 Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung**

Die z-Spiegelfläche der Raumspiegelecke wird, wie im eingebauten Zustand, mit dem erweiterten Messaufbau in vertikaler Richtung gemessen (vgl. Abbildung 3.5). Um den Einfluss der Oberflächentopographie des Umlenkspiegels auf die Messergebnisse zu minimieren, sind der Phasenschieber und der Referenzspiegel des Zygo-Interferometers direkt an der Oberseite vom MUX, welcher den einfallenden Lichtstrahl um 90° in Richtung Messobjekt ablenkt, montiert (vgl. Abbildung 3.15 oben). So befindet sich die Referenzplatte in vertikaler Lage und wird horizontal aufgehängt. Die Topographie der Referenzfläche wurde durch den Drei-Platten-Test in horizontaler Richtung kalibriert und die Messergebnisse in Kapitel 3.3.2 präsentiert.

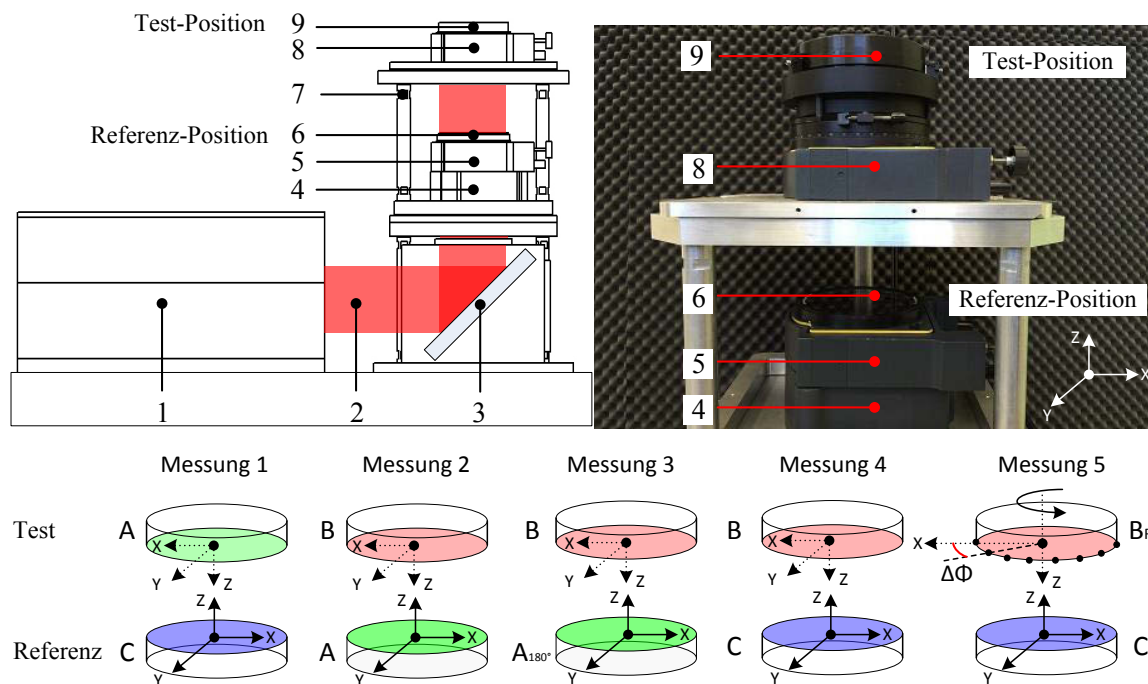


Abbildung 3.15: Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung. oben links: CAD-Modell des Messaufbaus (1 Zygo-Interferometer, 2 Laserstrahl, 3 Mux mit 90°-Umlenkspiegel, 4 elektronischer Phasenschieber, 5 Justage, 6 Referenzplatte (Referenz-Position), 7 Untergestell, 8 Justage mit integriertem Drehtisch, 9 Testplatte (Test-Position)); oben rechts: Foto des Messaufbaus; unten: Messprozedur zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung, bei der letzten Messung (Messung 5) wird die Platte B inkrementell mit definierter Winkelschrittweite  $\Delta\Phi$  gedreht. Damit werden in Messung 5 insgesamt 16 Messungen durchgeführt.

Durch die aus dem Eigengewicht der Platte resultierende Durchbiegung (Schwerkrafteinfluss) und die Auswirkung der unterschiedlichen Einspannungen der Spiegelfassung in horizontaler und vertikaler Lage (unterschiedliche mechanische Spannung durch Lageänderung) verändert sich jedoch die Topographie der Referenzfläche. Um diese bleibende Veränderung/Verformung der Referenzplatte in-situ zu bestimmen, wird der Drei-Platten-Test zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung durchgeführt.

In Abbildung 3.15 sind sowohl das CAD-Modell des Messaufbaus als auch der Ablauf der Messprozedur dargestellt. Die Konfiguration der Messung ist die Gleiche wie zuvor beim Drei-Platten-Test zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels. Wie in Abbildung 3.15 zu sehen ist, dient eine der drei Platten (in diesem Fall Platte A) einmal als Testplatte und einmal als Referenzplatte. Durch die beiden verschiedenen Einbaupositionen (vgl. Abbildung 3.16, Messung 1 und Messung 2) ergeben sich auch aufgrund der Durchbiegung der Platte  $\delta_g$ , die unter der Wirkung der Schwerkraft steht, zwei unterschiedliche Topographien. Dies wird jedoch nicht in den Formeln des Drei-Platten-Tests zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels in horizontaler

Messrichtung (vgl. Formel (3.8) und (3.9)) berücksichtigt. Die fünf Messdatensätze zur Kalibrierung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung unter Betrachtung der Durchbiegung  $\delta_g$  der Platte A sind:

$$\begin{aligned}
 \text{M1: } W_1(x, y) &= [C(x, y) - \delta_g(x, y)] + [A(-x, y) + \delta_g(-x, y)] \\
 \text{M2: } W_2(x, y) &= [A(x, y) - \delta_g(x, y)] + [B(-x, y) + \delta_g(-x, y)] \\
 \text{M3: } W_3(x, y) &= [A(-x, y) - \delta_g(x, y)] + [B(-x, y) + \delta_g(-x, y)] \\
 \text{M4: } W_4(x, y) &= [C(x, y) - \delta_g(x, y)] + [B(-x, y) + \delta_g(-x, y)] \\
 \text{M5: } W_5(x, y) &= [C(x, y) - \delta_g(x, y)] + \frac{1}{16} \sum_{k=1}^{16} [B(-x, y) + \delta_g(-x, y)]^{k \cdot \Delta\Phi}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Dabei bezeichnet  $k$  die Anzahl der Umdrehungen der Platte B und  $\Delta\Phi$  den Schrittwinkel. Für die Platten (hier B und C), deren Einbaulage nicht verändert wird, kann deren Durchbiegung bei der Berechnung ignoriert werden, weil sie sich während der Messung, wie in Formel (3.11) beschrieben, immer in der gleichen Orientierung (B in Position "Test" und C in Position "Referenz") befinden und gemessen werden. Deswegen sind genaue Kenntnisse über die Durchbiegung der Referenzfläche der Platte A, deren Einbaulage während des Drei-Platten-Tests stets geändert wurde, für eine erfolgreiche Kalibrierung der Platten in vertikaler Richtung entscheidend. Dieses intrinsische Problem wurde in zahlreichen Veröffentlichungen bereits erwähnt und ist auf unterschiedliche Weise gelöst worden [15, 14, 64, 91].

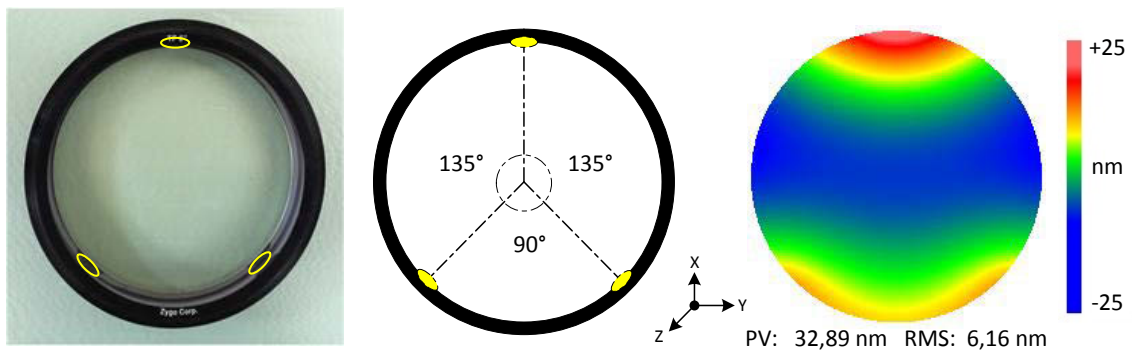


Abbildung 3.16: links: Zygo-6-Zoll-Referenzplatte (Ebenheitsnormal) für Interferometer; Mitte: Anordnung der Klebepads (Silikon) und Anschlussflächen (gelb markiert) an der Spiegelfassung (Aluminium); rechts: Ergebnis der FEM-Berechnung zur Plattendeformation (Darstellung der Topographie zur Bestimmung des PV-Wertes) – resultierende Verschiebung unter Eigengewicht (Durchmesser  $\varnothing = 150$  mm)

Es wurde eine Finite-Elemente-Berechnung (FEM-Berechnung) der Referenzplatte im montierten Zustand durchgeführt und die Ergebnisse in die Berechnung zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung mit einbezogen.

Die Referenzplatte aus Quarzglas mit einer Dicke von  $d = 28$  mm, einem Innendurchmesser von  $D_i = 152$  mm (Prüf- und Kalibrierbereich) und einem Außendurchmesser von  $D_a = 163$  mm wird durch drei nicht rotationssymmetrisch angebrachte Klebepads aus Silikon mit der Spiegelfassung verbunden und gehalten [5]. Ein Klebepad befindet sich am oberen Ende der Platte und die beiden anderen Pads jeweils in einem Winkel von  $135^\circ$  zu beiden Seiten, was zu unterschiedlichen Lagerreaktionen und unterschiedlichen Verlagerungen an den Klebepads bzw. der Platte führt. Für die FEM-Berechnung wird die Dicke der Pads zu  $d_{\text{pad}} = 1$  mm und die Kontaktfläche zu je  $A_{\text{pad}} = 10 \text{ mm}^2$  angenommen. In Abbildung 3.16 rechts ist das Ergebnis der FEM-Berechnung dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es insbesondere in den äußeren Bereichen der Platte, wo die mechanischen Spannungen über die Fixierungspads eingeleitet wurden, zu leichten Deformationen der Oberfläche kommt. Außerdem ist die Verformung unsymmetrisch um den Plattenmittelpunkt verteilt. Das ist auf die Lager von drei Punkthaltern zurückzuführen. Mittels FEM-Berechnung lässt sich unter den gegebenen Randbedingungen eine maximale Deformation an der Referenzfläche (für den inneren Messbereich von  $D_i = 152$  mm) der Platte A von rund 33 nm (PV) ermitteln (vgl. Abbildung 3.16 rechts). Dabei befindet sich die größte Verformung ( $> 20$  nm PV) der Platte außerhalb eines konzentrischen Durchmesser von  $D = 120$  mm. In Abbildung 3.17 sind die berechneten Ergebnisse einerseits als Falschfarben-Darstellung, andererseits als 3D-Darstellung abgebildet.



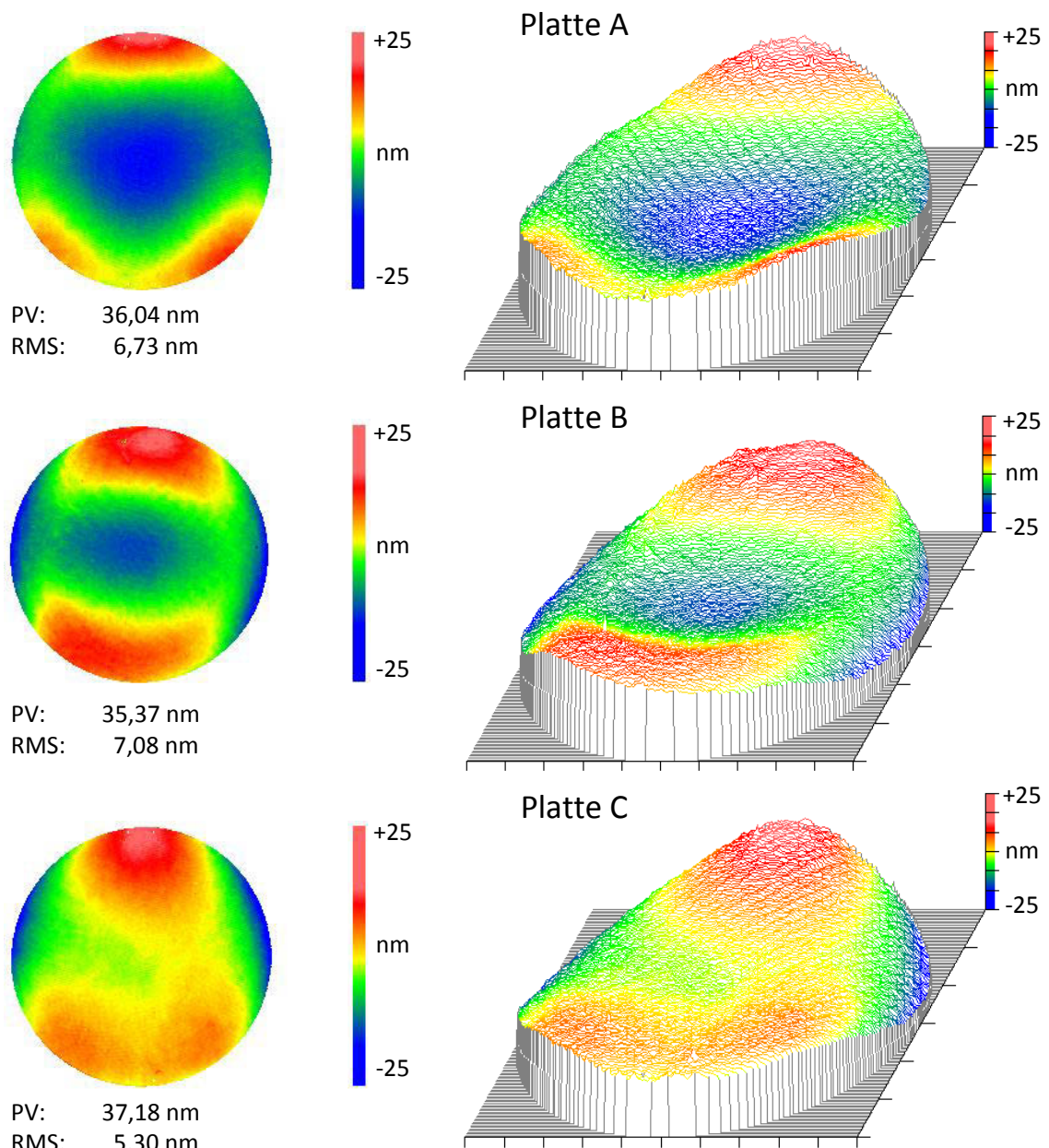


Abbildung 3.17: Darstellung von Messergebnissen des Drei-Platten-Tests zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung (FEM-Modell wurde zur Korrektur verwendet)

Im Vergleich mit dem Messergebnis des Drei-Platten-Tests zur flächenhaften Absolutprüfung des Referenzspiegels in horizontaler Messrichtung (vgl. Abbildung 3.12) erreichen die Messergebnisse des Drei-Platten-Tests in vertikaler Messrichtung einen deutlich höheren PV-Wert. Dies entspricht den erwarteten Ergebnissen der FEM-Berechnung (vgl. Abbildung 3.16 rechts). Für diesen Fall beträgt der experimentell ermittelte PV-Wert der zu kalibrierenden Platte A 36,04 nm und der Wert aus der FEM-Berechnung 32,89 nm.

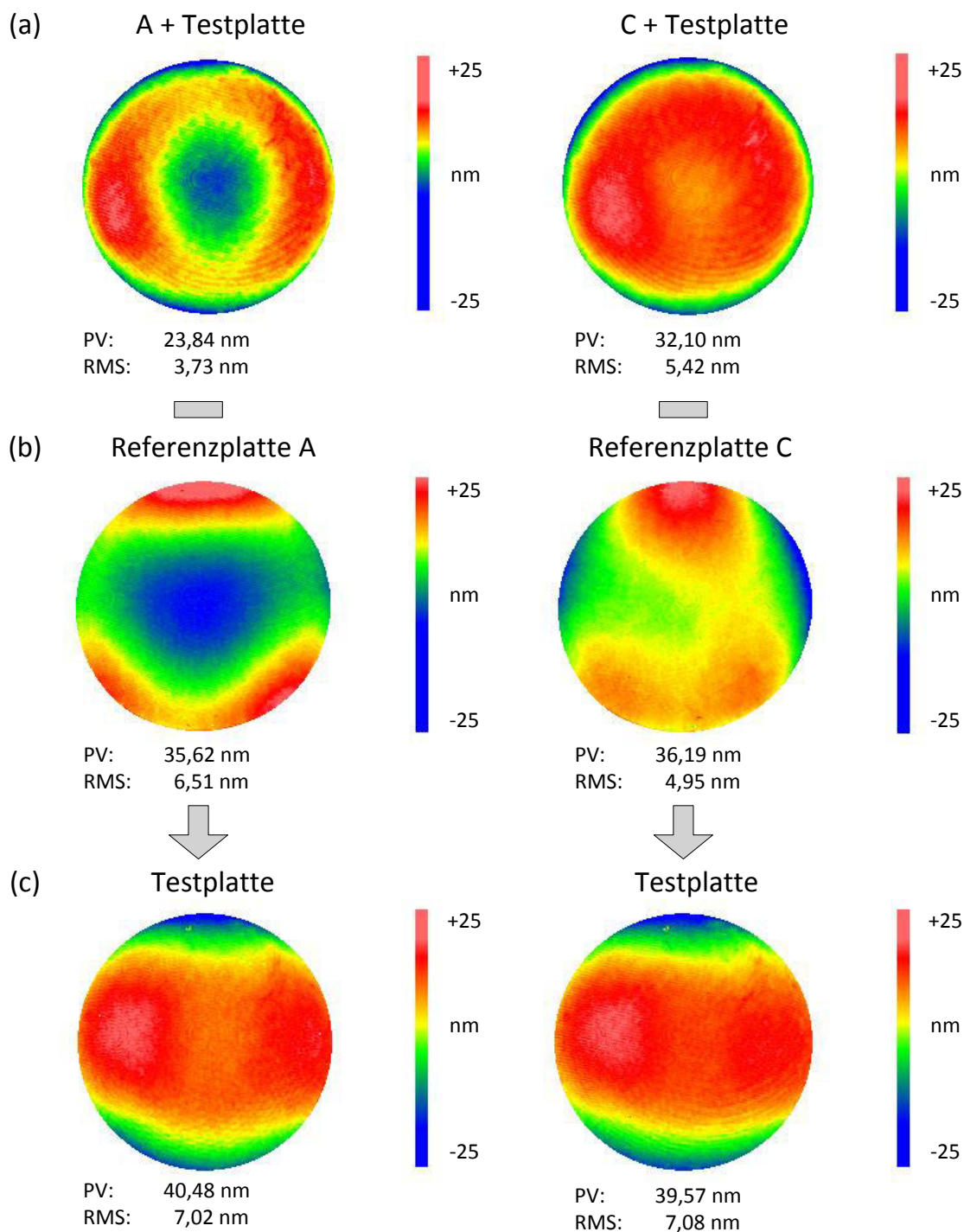


Abbildung 3.18: Vergleich der Messergebnisse (Durchmesser  $\varnothing = 145$  mm) bei Verwendung unterschiedlicher Referenzplatten mit bekannter Topographie, die durch Drei-Platten-Tests zur flächenhaften Absolutprüfung in vertikaler Messrichtung kalibriert wurden: (a) Ergebnisse der Topographiemessung ohne Berücksichtigung der verwendeten Referenzplatten, (b) Abweichungen der Referenzfläche der verwendeten Referenzplatten, (c) Ergebnisse nach der Korrektur der Topographien der verwendeten Referenzplatten

In Abbildung 3.18 sind zur Veranschaulichung die Messergebnisse der Topographie einer in vertikaler Messrichtung untersuchten Testplatte (Durchmesser  $\varnothing = 145$  mm mit einer Formabweichung der Oberfläche unter  $\lambda/4$  PV bei 633 nm, BK7) jeweils mit und ohne



Berücksichtigung der Formabweichung der verwendeten unterschiedlichen Referenzplatten (A und C), die durch den Drei-Platten-Test zur flächenhaften Absolutprüfung kalibriert wurden, dargestellt. Die dargestellten Beispiele zeigen, dass die Formabweichung der Referenzfläche der gewählten Referenzplatte im eingebauten vertikalen Zustand berücksichtigt werden muss. Die Unterschiede der Messergebnisse (vgl. Abbildung 3.18a) sind ohne Berücksichtigung der verwendeten Referenzplatten sowohl bezüglich der Topographie als auch der PV- und RMS-Werte wesentlich. Deshalb müssen die Formabweichungen der Referenzfläche der gewählten Referenzplatte (vgl. Abbildung 3.18b) von allen Messergebnissen abgezogen werden, um diese Verfälschungen zu eliminieren. In Abbildung 3.18c sind die Ergebnisse nach der Korrektur dargestellt. Die Differenz beider PV-Werte (vgl. Abbildung 3.18a und Abbildung 3.18c) mit und ohne Korrektur der Formabweichung der verwendeten unterschiedlichen Referenzplatten (A und C) konnte von 8,3 nm auf 1 nm reduziert werden bzw. bei den RMS-Werten von 1,7 nm auf 0,1 nm.

In Abbildung 3.19 sind die Differenzen zwischen den erfassten topographischen Messdaten (vgl. Abbildung 3.18c) mit Korrektur der Formabweichung der verwendeten unterschiedlichen Referenzplatten sowohl in der 3D-Ansicht als auch im Profilschnitt (rote Kurve - horizontales Profil, blaue Kurve - vertikales Profil) dargestellt.

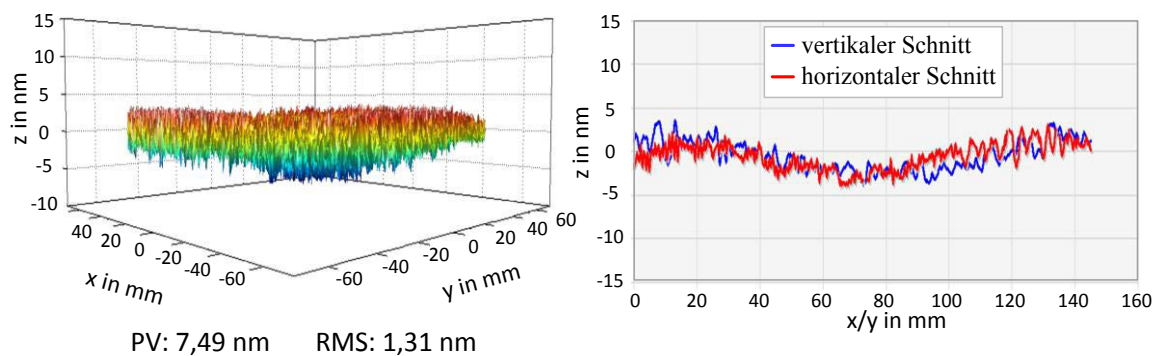


Abbildung 3.19: Differenz der erfassten topographischen Messdaten mittels Referenzplatten A und C: Differenz ((A+Testplatte) – (C+Testplatte), vgl. Abbildung 3.18c) zwischen beiden korrigierten Messwerten nach der Korrektur der Topographien der verwendeten Referenzplatten A und C

Es wird damit gezeigt, dass bei Korrektur der Referenzflächen von Platten A und C Restabweichungen von ca. 7,5 nm PV und 1,3 nm RMS erreicht werden können. Um den Einfluss der Formabweichung der Referenzfläche der Referenzplatten zu verdeutlichen, sind in Abbildung 3.20 sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Profilverläufe der beiden Ergebnisse (vgl. Abbildung 3.18a und c) bei Verwendung unterschiedlicher Referenzplatten mit Korrektur systematischer Messabweichungen übereinandergelegt. Es

lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Ergebnissen nach der Korrektur beobachten.

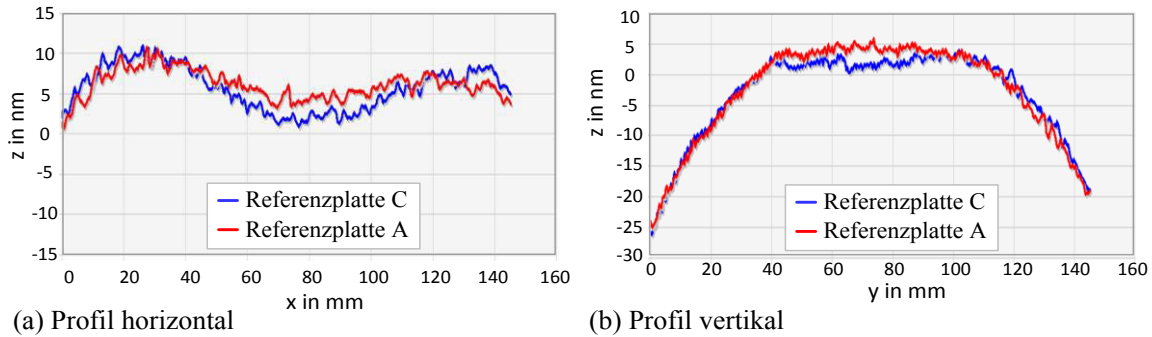


Abbildung 3.20: Darstellung der Profileverläufe von Messergebnissen der Testplatte (Durchmesser  $\varnothing = 145$  mm, BK7) bei Verwendung unterschiedlicher Referenzplatten (Platten A und C) mit Korrektur systematischer Messabweichungen, entstehend durch die Formabweichungen der Referenzfläche (rote Kurve - gemessen durch Referenzplatte C, blaue Kurve - gemessen durch Referenzplatte A)

Im Vergleich zur horizontalen Messung stellen bei der vertikalen Messung die Auswirkungen der unterschiedlichen Einspannungen der Spiegelfassung in Test- und Referenzlage eine weitere Abweichungsquelle dar. Streng genommen sollte der Betrag der Durchbiegung  $\delta_g$  der Platte A in Position "Test" und in Position "Referenz" identisch und deren Orientierung umgekehrt sein, wie in Formel (3.11) beschrieben. Aber in der Praxis kann wegen der unterschiedlichen horizontalen Einspannung der Spiegelfassung in den Lagern zwischen den Beträgen der Durchbiegung  $\delta_{gT}$  in Position "Test" und  $\delta_{gR}$  in Position "Referenz" ein minimaler Unterschied  $\Delta\delta_g$  bestehen (vgl. Abbildung 3.15). Die Abschätzung der daraus resultierenden Abweichung  $\Delta\delta_g$  wurde mit Hilfe der FEM-Analyse untersucht [5]. Die aus der Simulation erhaltene  $\Delta\delta_g$  innerhalb der Platte mit dem Durchmesser  $D_i = 153$  mm beträgt ca. 4,5 nm PV und ist damit kaum signifikant. Deswegen wurde diese nicht quantifizierbare Abweichung und deren Wirkung in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Durch die beschriebenen Kalibriervorgänge kann die vollständige Oberflächentopographie der Referenzplatte des Fizeau-Interferometers sowohl in vertikaler Messrichtung als auch in horizontaler Messrichtung hochpräzise bestimmt werden. Diese wird hinterlegt und ermöglicht fortan die Korrektur systematischer Messabweichungen. Durch die Subtraktion der kalibrierten Topographieabweichungen der Referenzplatte von einer idealen Ebene wird die Genauigkeit nachfolgender Messungen signifikant erhöht.

### 3.5 Subapertur-Stitching-Verfahren für großflächige Topographiemessung

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, sollen im Rahmen dieser Arbeit die Oberflächen (x-, y- und z-Spiegel) der Raumspiegelecke der NPM-200 mit Subapertur-Stitching-Verfahren vermessen werden. Die in der konventionellen Interferometrie (6 Zoll Zygo-GPI-Phasenschiebeinterferometer) geltenden Einschränkungen des Gesamtmessbereiches aufgrund der begrenzten Größe der Apertur können damit aufgehoben werden. Die gesamte zu messende Oberfläche wird dabei in kleinere Teilbereiche (Subaperturen) unterteilt. Die interferometrisch auswertbaren Subaperturen werden Schritt für Schritt ermittelt. Die Positioniergenauigkeit sowie die Präzision der Kalibrierung des Positioniersystems ist nicht ausreichend, um die Einzelmessdaten ohne Korrekturmaßnahmen in ein gemeinsames Koordinatensystem zusammenzuführen (Abweichungen). Aus diesem Grund wird eine Software eingesetzt, um die aufgenommenen Datensätze (Subtopographien) mithilfe eines speziellen Stitching-Algorithmus zu einer gesamten Topographie erfolgreich zu rekonstruieren.

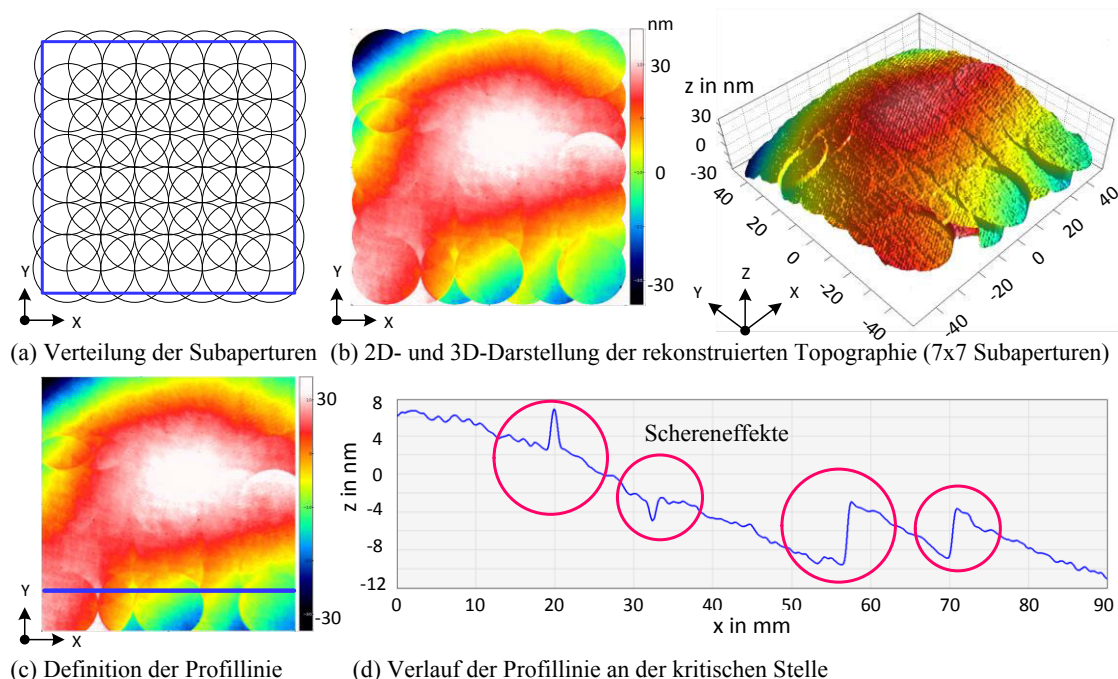


Abbildung 3.21: Stitching-Ergebnisse unter Anwendung einer konventionellen Software MountainsMap<sup>®</sup> (Messbeispiel zum Zusammenfügen von 49 (aus 7x7 Subaperturen, die Überlappung zwischen zwei benachbarten Subaperturen (Messfeldern) betrug ca. 40 %) Einzelmessungen (Stitching) zur Erzielung eines großen Gesamtmessfeldes bei konstanter Lateralauflösung mit dem Zygo-Interferometer. Messobjekt: quadratische  $\lambda/4$  Oberflächenspiegel mit Enhanced Aluminium Beschichtung, Einzelmessfeld: Messapertur mit 25 mm Durchmesser, Gesamtmessfeld: 100 x 100 mm<sup>2</sup>)

Es gibt eine Vielzahl kommerzieller Stitching-Software (z. B. Softwarebestandteil von MountainsMap<sup>®</sup>, topoStitch<sup>®</sup> usw.) auf dem Markt, die aber für das am Institut für PMS speziell entwickelte Messsystem nicht geeignet sind bzw. erst entsprechend angepasst werden müssten. Erste Untersuchungen unter Verwendung des Stitchingmoduls der kommerziellen Auswertesoftware MountainsMap<sup>®</sup> an einem 100 mm x 100 mm Spiegel zeigen das Potential des Ansatzes. Bei diesem Messbeispiel sind insgesamt neunundvierzig Subtopographien (Gesamtmessfeld: Verkettung von 7x7 Einzelmessungen) mit einem Messfelddurchmesser von 25 mm aufgenommen worden. Die einzelnen benachbarten Subaperturen (Messfelder) überlappen sich gegenseitig jeweils zu ungefähr 40 % (Schnittmenge zweier Kreise mit jeweils dem gleichen Radius und die Mittelpunkte der beiden Kreise liegen auf der Kreislinie des jeweils anderen Kreises). Die Stitching-Ergebnisse werden in Abbildung 3.21 sowohl in der 3D-Darstellung als auch in der Schnittdarstellung gezeigt.

Die Stitching-Ergebnisse zeigen an einigen Messbereichen erkennbare negative Schereneffekte. Die Verwendung der hier getesteten kommerziellen Software ist damit unzureichend und nicht zum Stitchen der Messdaten der Topographie der kreisförmigen Teilbereiche (Subaperturen) geeignet. Mit der Auswertesoftware MATLAB<sup>®</sup> kann in der 2D-Topographiedarstellung eine Profillinie (vgl. Abbildung 3.21c) an der kritischen Stelle definiert werden. Das resultierende Linienprofil kann direkt ausgemessen und dargestellt werden (vgl. Abbildung 3.21d), um diese Effekte deutlich zu erkennen und die Zuverlässigkeit der Stitching-Software abzuschätzen. Solche Schereneffekte sind aus einem oder mehreren der nachfolgenden Gründe entstanden:

- In den meisten Fällen sind die Messwerte des Zygo-Interferometers jeweils kreisförmig aufgenommen und an den Randbereichen abgeschnitten worden. An den Rändern der Subaperturen treten falsche Hözensprünge auf. Deshalb ist es technisch besonders schwierig, die Höhenwerte der benachbarten Subaperturen in den Überlappungsbereichen anzupassen.
- Die Formen der gemessenen Topographien der benachbarten Subaperturen in den paarweisen Überdeckungsregionen (Überlappungsbereichen) sind nicht exakt identisch.
- Die z-Absolutwerte (z-Offset für die Höhenanpassung) der benachbarten Subaperturen in den paarweisen Überdeckungsregionen sind nicht äquivalent.

Zudem ist es mit kommerzieller Stitching-Software nicht möglich, unterschiedliche Stitching-Algorithmen zu implementieren und zu erproben und durch diese Ergebnisse begründete Empfehlungen für ein weiteres Vorgehen ableiten zu können. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemeinsam mit der Gesellschaft für

Bild- und Signalverarbeitung (GBS) mbH eine neue Stitching-Software „SmartStitching“ entwickelt, die speziell auf die hier beschriebene Anwendung ausgelegt ist und für die Datenverarbeitung des Subapertur-Stitching-Verfahrens verwendet wurde. Ein geeigneter Stitching-Algorithmus wurde ausgewählt und in „SmartStitching“ umgesetzt.

### 3.5.1 Stitching-Software „SmartStitching“

Die Software „SmartStitching“ dient zum Stitchen von Messdaten, die mit dem Zygo-Interferometer und der Messsoftware MetroPro<sup>®</sup> gewonnen wurden. Dabei müssen sich die benachbarten Messdatenfelder in einer Koordinatenachse zu ca. 40 bis 50 % überdecken. Im Gegensatz zu anderer konventioneller Stitching-Software wird hier das Verfahren zum Subapertur-Stitching nach Otsubo [65] eingesetzt, was dem klassischen Ansatz für das Subapertur-Stitching von Interferometerdaten entspricht. Die Grundannahme des Verfahrens besteht darin, dass die Abweichungen der Tischpositionierung in x- und y-Richtung sowie die Verdrehung um die z-Achse gegenüber dem Messpunktraster vernachlässigbar sind. Idealerweise sollte das XY-Positioniersystem immer um ein ganzes Vielfaches des Messpunktrasters verschoben werden, damit die Messpunkte in einem durchgängigen Raster liegen. Es werden also nur Neige- und Kippfehler sowie Abstandsabweichungen des Tisches korrigiert. In diesem Fall wird das Messpunktraster so ausgelegt, dass Offset und Verkippungswinkel mit hinreichender Genauigkeit aus dem Überlappungsbereich benachbarter Subaperturen ermittelt werden können. Es wird deshalb vorausgesetzt, dass die laterale Position des Messfeldes hinreichend genau bekannt ist [65, 94]. Aus den registrierten Messdaten wird ein zusammenhängender Datensatz erzeugt und mit einstellbarer Auflösung als ASCII-Datei ausgegeben. Anschließend werden die Oberflächenkenngrößen der rekonstruierten Topographie der Messprobe durch die Auswertprogramme nach anerkannten nationalen (DIN-Normen) und internationalen Standards (ISO-Normen) ausgewertet und weiter analysiert. Neben der Bildbearbeitungssoftware MetroPro<sup>®</sup> des Geräteherstellers wurden zwecks Validierung und Erweiterung der Auswertungsfunktionen noch zwei weitere Softwarepakete SPIP<sup>®</sup> und MountainsMap<sup>®</sup> im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Nachfolgend werden die Funktionsweise des angewandten Stitching-Algorithmus und die Verifizierung der Funktionalität des Algorithmus beschrieben.

#### 3.5.1.1 Funktionsweise des angewandten Stitching-Algorithmus

Die Funktionsweise des angewandten Stitching-Algorithmus ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Die gesamte zu messende Oberfläche des Messobjektes ist innerhalb des blauen Rechtecks definiert. Die Subaperturen  $S_i$  ( $i = 1, 2 \dots N$ ), die durch gestrichelte Kreise gekennzeichnet sind, überdecken zusammengekommen die gesamte Oberfläche des

Messobjektes. Die Größe der Subapertur hängt vom verwendeten Interferometer ab. In diesem Beispiel werden neun Subaperturen ( $S_1$  bis  $S_9$ ) für die gesamte zu messende Oberfläche des Messobjektes zusammengesetzt.

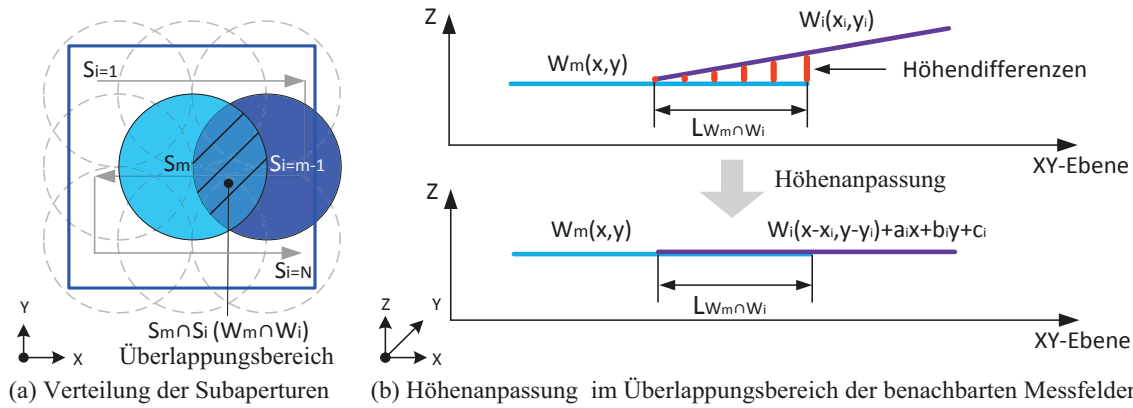


Abbildung 3.22: Funktionsweise des Stitching-Algorithmus für das Subapertur-Stitching-Verfahren

Die in der Abbildung dargestellten  $W_m$ ,  $W_{i=m-1}$  sind die gemessene Wellenfronten (Subtopographien) zweier benachbarter Subaperturen ( $S_m$ ,  $S_{i=m-1}$ ) auf dem Gebiet des zu messenden Messobjektes. Sie überlappen sich gegenseitig jeweils zu 40 % (schraffierte Bereiche  $S_m \cap S_i$  in der Abbildung 3.22a).  $W_m$  wird in diesem Fall als Referenzdatensatz für die Registrierung verwendet.  $x_i$  und  $y_i$  bezeichnen die Positionen im XY-Positioniersystem (XY-Verschiebetisch), wenn die Subapertur  $S_i$  gemessen wird.  $a_i$ ,  $b_i$  und  $c_i$  sind die Transformationsparameter für die Korrektur (Korrekturfaktoren), die als Systemfehler (Stitching-Fehler des Datensatzes zum Referenzdatensatz) in den Formdaten der Subaperturen  $S_i$  enthalten sind. Idealerweise sind die Wellenfronten der benachbarten Subaperturen in den Überlappungsbereichen gleich ( $a_i$ ,  $b_i$  und  $c_i$  sind gleich Null) und es ergeben sich keine Höhendifferenzen in der XY-Ebene. Dies ist in der Praxis aber kaum möglich. Im praktischen Test stimmt die Wellenfront der benachbarten Subaperturen in den Überlappungsbereichen nicht überein, weil es Neigungs- und Verschiebungsabweichungen zwischen den Wellenfronten gibt, was die Höhendifferenzen in der XY-Ebene verursacht (vgl. Abbildung 3.22b). Aufgrund der Führungsabweichungen des XY-Verschiebetisches, welche senkrecht zur Verfahrrichtung des Positioniersystems auftreten, sind die Subaperturen nicht wie erwünscht parallel zur Referenzplatte ausgerichtet. Dadurch werden die Subaperturen in unterschiedlichen Neigungen zur Referenzplatte des Interferometers gemessen. Dies verursacht einen Neige- und Kippfehler sowie Abstandsabweichungen zwischen den Wellenfronten in den Überlappungsbereichen. Außerdem treten aufgrund der Systemabweichungen des Interferometers zusätzliche Abweichungen in den Überlappungsbereichen auf. Das Ziel des angewandten Stitching-Algorithmus ist es, in allen Überdeckungsgebieten der Messdatensätze die Höhendifferenzen zu minimieren (vgl. Abbildung 3.22b). Deswegen müssen die

Transformationsparameter für die Korrektur  $a_i$ ,  $b_i$  und  $c_i$  für die kompletten Datensätze der Subaperturen mittels eines komplexen Stitching-Algorithmus präzise ermittelt werden, um die durchgeführten Messungen an den verschiedenen, benachbarten Messfeldern untereinander anzupassen. Schließlich werden die gemessenen Subtopographien zusammengesetzt, um die komplette Oberfläche des Messobjektes zu erhalten.

Der Sticking-Prozess der Software „SmartStitching“ läuft wie folgt ab. Zunächst werden entsprechend den Bedienereingaben alle Messdaten der Subaperturen in einem globalen Koordinatensystem mit dem durch die Messungen vorgegebenen Messpunktraster angeordnet. Anschließend wird eine globale Belegungskarte berechnet, in der die Belegung des globalen Messpunktrasters mit den einzelnen Messdatensätzen gekennzeichnet wird. Wenn die Messdatensätze gegenüber dem globalen Raster um Teile der Rasterschrittweite verschoben sind, wird die Position auf die nächste Rasterposition gerundet und der Wert an dieser Stelle interpoliert. Dies dient zur Ermittlung der paarweisen Überdeckungsgebiete der Messdatensätze. Gleichzeitig werden die Bereiche außerhalb einer globalen Maskierung sowie einer kreisförmigen Randmaske für jeden Messdatensatz ausgeblendet. Anschließend dient dieser Belegungsplan dazu, entsprechend [65] die abweichenden Summen in den paarweisen Überdeckungsregionen zu berechnen. Dabei werden die Einzeldatensätze auf den Referenzdatensatz bezogen. Es wird ein Messdatensatz der Subaperturen  $S_m$  (Referenz-Subapertur) als Referenzdatensatz  $W_m$  (gemessene Wellenfront) festgelegt, der sich vorzugsweise in der Mitte des Messfeldes befinden sollte. Gleichung (3.12) erfasst die Verknüpfung zwischen dem Referenzdatensatz  $W_m$  und den Datensätzen der restlichen Subaperturen  $W_i$  ( $i = 1$  bis  $N$ , außer  $m$ ), vorausgesetzt die Höhenwerte der Messdatensätze liegen in den beiden Überlappungsbereichen in der gleichen Größenordnung.

$$W_m(x, y) = a_i x + b_i y + c_i + W_i(x - x_i, y - y_i) \quad (3.12)$$

$a_i$ ,  $b_i$  sind die Koeffizienten für Neige- und Kippfehler in der XY-Ebene.  $c_i$  ist eine konstante Phasenverschiebung, die aufgrund der vertikalen Bewegung des Messobjektes auftritt. Die Koeffizienten  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  können als Abstandsabweichung des XY-Verschiebetisches definiert werden. Wie aus der vorstehenden Gleichung (3.12) hervorgeht, fließen alle paarweisen Überdeckungen gleichzeitig in die Berechnung ein, so dass ein sehr stabiler Verbund der Messdatensätze entsteht. Auf diese Weise wurde die akkumulierte Abweichung der Formdaten in den jeweiligen Überlappungsbereichen durch einen umfangreichen schrittweisen Stitching-Prozess (schrittweise Registrierung der einzelnen Subaperturen) wesentlich reduziert. Die Koeffizienten  $a_i$ ,  $b_i$  und  $c_i$  sollten so bestimmt werden, dass die Abweichungsquadratsumme  $\Delta$  minimiert wird. Die Berechnung

wird iterativ nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt, wie in Gleichung (3.13) dargestellt.

$$\Delta = \sum_{i=1}^N \{W_m(x, y) - [a_i x + b_i y + c_i + W_i(x - x_i, y - y_i)]\}^2 \quad (3.13)$$

Dazu werden die gleich Null gesetzten partiellen Ableitungen nach den Variablen gelöst. Dabei müssen alle partiellen Ableitungen von  $\Delta$  bezüglich  $a_i$ ,  $b_i$  und  $c_i$  gleich Null sein ( $\partial\Delta/\partial a_i = 0$ ,  $\partial\Delta/\partial b_i = 0$  und  $\partial\Delta/\partial c_i = 0$ ), dann wird  $\Delta$  minimiert. Die Ergebnisse der partiellen Ableitungen werden in Matrizen  $P_{ij}$ ,  $Q_{ij}$  und  $R_i$  zusammengestellt [65], wie in der Gleichung (3.14) gezeigt.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i \cap j} x^2 & \sum_{i \cap j} xy & \sum_{i \cap j} x \\ \sum_{i \cap j} xy & \sum_{i \cap j} y^2 & \sum_{i \cap j} y \\ \sum_{i \cap j} x & \sum_{i \cap j} y & n_{ij} \end{bmatrix}, \quad Q_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i \cap j} x \Delta(x, y) \\ \sum_{i \cap j} y \Delta(x, y) \\ \sum_{i \cap j} \Delta(x, y) \end{bmatrix}, \quad R_i = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

wobei  $i, j$  ( $i, j = 1, 2 \dots m-1, m+1 \dots N$ ) ganzzahlige Indizes für die Subaperturen (außer  $m$ , Index der Referenz-Subaperturen  $S_m$ ) und  $\Delta(x, y) = W_i(x, y) - W_j(x, y)$  sind. Der Wert  $n_{ij}$  beinhaltet alle Messpunkte in den Überlappungsbereichen ( $i \cap j$ ). Wenn es keine Überlappung zwischen den Subaperturen  $S_i$  und  $S_j$  gibt, dann werden  $P_{ij}$  und  $Q_{ij}$  Nullmatrizen sein. Für die Berechnung werden die x- und y-Koordinaten aller Messpunkte der Subaperturen in ein globales Koordinatensystem transformiert.

Das lineare Gleichungssystem unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate wird in einer Matrixform gemäß der folgenden Gleichung (3.15) dargestellt und mit dem Gauß-Verfahren gelöst [65].

$$\left[ \left( \sum_k^N P_{ik} \right)_j \right] = \left[ \left( Q_{ij} - \sigma_{ij} \sum_k^N Q_{ik} \right)_{ij} \right] [(R_i)_j] \quad (3.15)$$

wobei  $k$  eine ganze Zahl von 1 bis  $N$  (einschließlich der Indexzahl  $m$  der Referenz-Subapertur  $S_m$ ) ist.  $\sigma_{ij}$  ist die Kronecker-Delta Funktion [65]. In diesem Fall ist  $\sigma_{ij}$  gleich Null, wenn  $i$  gleich  $j$  ist, sonst ist  $\sigma_{ij}$  eins ( $i \neq j$ ).



In der Ergebnismatrix  $R_i$  liegen die Transformationsparameter für die Korrektur der Einzeldatensätze mit Ausnahme des Referenzdatensatzes vor. Mit diesen Parametern werden die Höhenwerte der Einzeldatensätze transformiert. Danach werden mit Hilfe der Belegungskarte in den paarweisen Überdeckungsgebieten die Höhendifferenzen zwischen den Datensätzen ermittelt und als RMS-Wert ausgegeben (mittlere Summe der Beträge der Differenzen). Nach der Registrierung werden alle Datensätze zu einer Punktwolke zusammengefasst. Die wesentlichen Vorteile des hier angewandten Stitching-Algorithmus können wie folgt zusammengefasst werden:

- Globale Minimierung des Registrierungsfehlers durch Anpassung der lokalen Transformationen der Messfelder
- Kein iteratives Verfahren (sehr kurze Berechnungszeit)
- Gleichzeitige Verrechnung aller Überdeckungsgebiete, um die Kumulation innerhalb des Stitching-Prozesses zu reduzieren
- Präzise Korrektur von Neige- und Kippfehlern sowie von Abstandsabweichungen

Zum besseren Verständnis folgt im nächsten Abschnitt eine kurze Einführung in die Stitching-Software „SmartStitching“.

#### **3.5.1.2 Einführung in die Stitching-Software „SmartStitching“**

Die Abbildung 3.23 zeigt die Bedienoberfläche der Stitching-Software „SmartStitching“. Von dieser Oberfläche ausgehend lassen sich alle Parameter visualisieren und einstellen. Die Applikation besitzt ein Viewer-Fenster, in dem alle Messdaten der Subaperturen in einem globalen Koordinatensystem angezeigt werden und eine Anzahl von Steuerelementen, die zur Konfiguration des Stitching-Prozesses dienen.

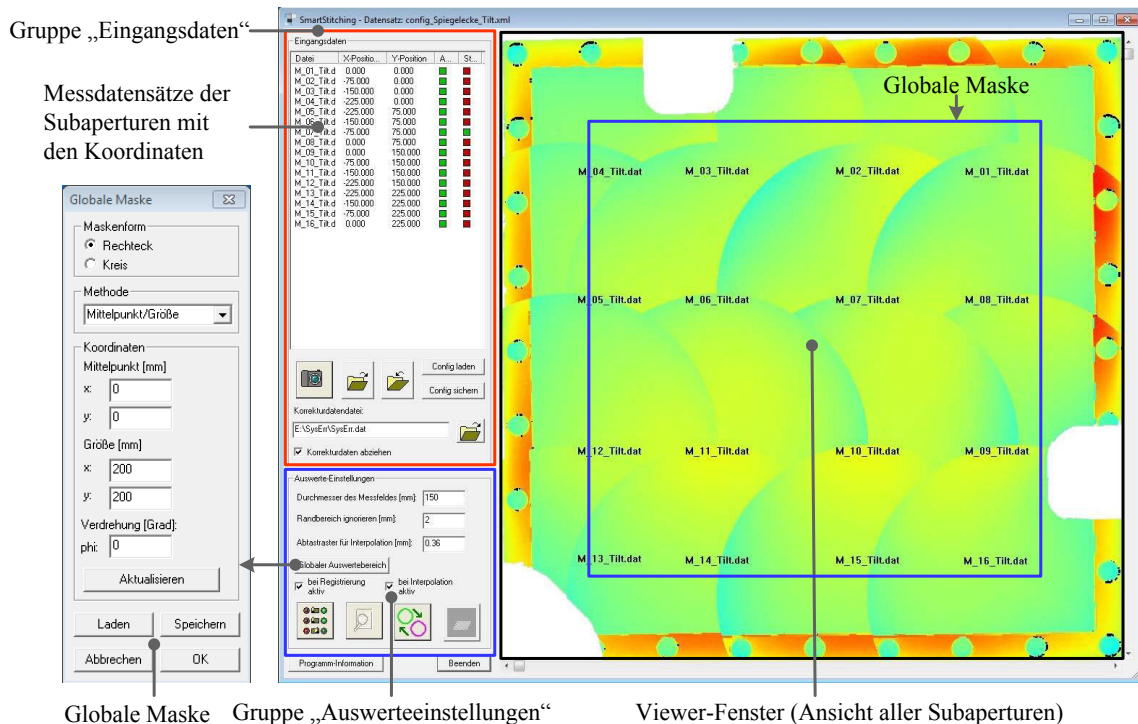


Abbildung 3.23: Bedienoberfläche der Stitching-Software „SmartStitching“

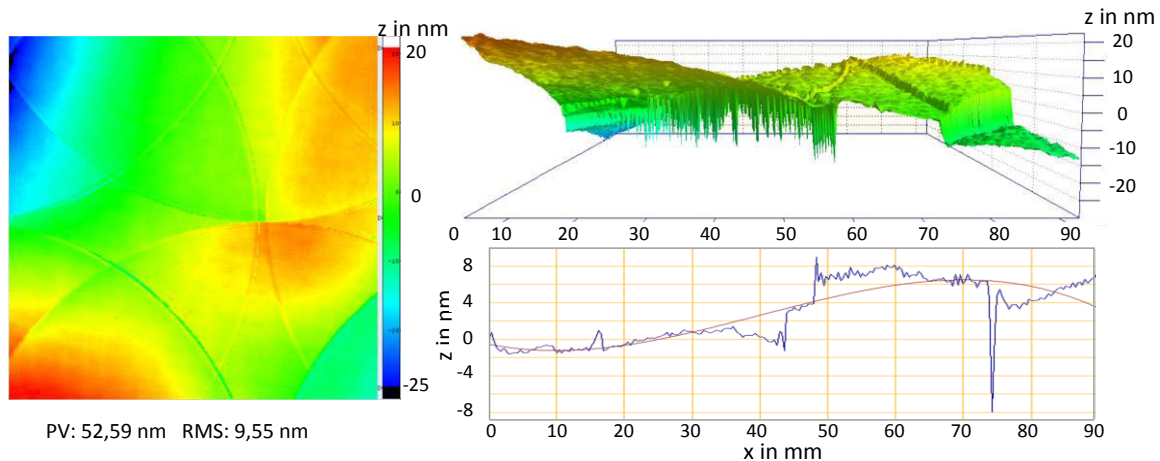
Die Steuerelemente werden in zwei Hauptgruppen unterteilt: Gruppe „Eingangsdaten“ und Gruppe „Auswerte-Einstellungen“, wie in Abbildung 3.23 links oben dargestellt. Die Gruppe „Eingangsdaten“ der Steuerelemente enthält eine Tabelle mit den geladenen Messdatensätzen der Subaperturen. Zusätzlich müssen zu den einzelnen Messdaten die x- und die y-Koordinaten der Mittelpunktspositionen (Positionswerte) im Messfeldraster angegeben werden. Damit kann der Überlappungsbereich leichter analysiert werden. Es darf nur ein Messdatensatz als Referenzdatensatz festgelegt und später für die Registrierung verwendet werden. Der Referenzdatensatz, der sich vorzugsweise in der Mitte des Messfeldes befinden sollte, ist als Mittelpunkt gekennzeichnet. Alle geladenen Messdatensätze können in 2D als Falschfarbenbild für Überwachungs- und Kontrollzwecke dargestellt werden (vgl. Abbildung 3.23, rechte Seite). Außerdem kann der Kalibrierwert der Referenzplatte des Interferometers (Topographiedatei der Referenzplatte) als Korrekturdatendatei bei der Auswertung verrechnet werden.

Die Gruppe „Auswerteeinstellungen“ der Steuerelemente legt das Verhalten der Software bei der Registrierung der Messdaten fest (vgl. Abbildung 3.23, links unten). Die Software geht von kreisförmigen Messfeldern aus, wie sie von Zygo-Interferometern bereitgestellt werden. Zuerst werden der Durchmesser des Messfeldes (Subaperturdurchmesser) und die Gitterkonstante (laterale Auflösung des verwendeten Interferometers) für eine Interpolation der registrierten Messdaten in die Eingabefelder eingegeben. Die einzelnen Messfelder können durch die Funktion „Randbereich ignorieren“ zusätzlich beschnitten werden. Ziel

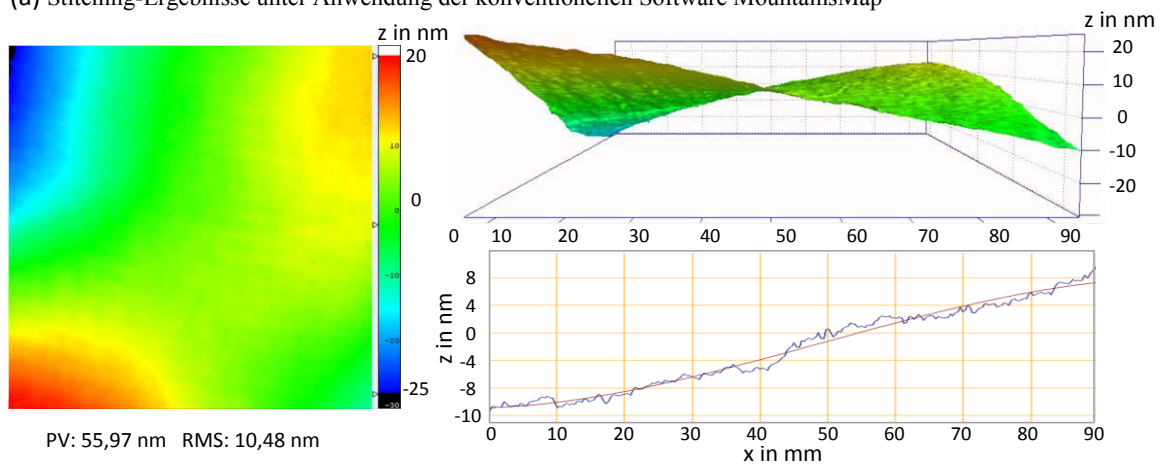
ist es, einen Randbereich von den einzelnen Messfeldern, der möglicherweise durch fehlerhafte Messwerte gekennzeichnet ist, von der Berechnung auszuschließen. Zusätzlich ermöglicht die Software dem Anwender das Einstellen einer globalen Maske (globale Auswertebereich) auf dem gesamten Messfeld. Damit kann ein störender Randbereich mit ungültigen Daten außerhalb des relevanten Messfeldes von der Berechnung ausgeschlossen werden, um möglichst zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten. Die globale Maske kann je nach Bedarf nach Form (kreisförmig oder rechteckig) und Größe ausgewählt werden. Die Koordinaten des Mittelpunktes der Maske können entweder in die Eingabefelder manuell eingegeben werden oder befinden sich automatisch in der Mitte des kompletten Datensatzes (von der Software berechnete Werte).

Nach Eingabe und Bestätigung aller notwendigen Parameter wird die Berechnung des Stitchings (Stitching-Auswertung) gestartet. Aus den Subaperturmessungen und unter Berücksichtigung der zugehörigen Positionsparameter wird ein Koeffizientensatz der Transformationsparameter für die Korrektur der Einzeldatensätze berechnet. Aus diesem Koeffizientensatz werden die Höhenwerte der Einzeldatensätze transformiert. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Berechnung kann die Ergebnis-Punktwolke als rekonstruierte Gesamttopographie in 2D als Falschfarbenbild angezeigt werden. Diese wird dann in dem gewünschten Raster interpoliert (Shepard-Interpolation) und die Ergebnis-Punktwolke als ASCII-Datei abgespeichert. Schließlich wird eine Protokolldatei mit Eingabewerten und Resultaten für die spätere Prüfung erstellt.

Um die Einsatzfähigkeit (das Potential des Ansatzes) der „SmartStitching“ zu beurteilen, wurde eine Vergleichsuntersuchung zwischen „SmartStitching“ und kommerzieller Stitching-Software MountainsMap<sup>®</sup> an einem 90 mm x 90 mm Spiegel durchgeführt. Bei diesem Messbeispiel sind insgesamt neun Subtopographien (Gesamtmeßfeld: Verkettung von 3x3 Einzelmessungen) mit einem Meßfelddurchmesser von 60 mm aufgenommen worden. Die einzelnen benachbarten Subaperturen (Messfelder) überlappen sich gegenseitig jeweils zu ungefähr 40 %.



(a) Stitching-Ergebnisse unter Anwendung der konventionellen Software MountainsMap®



(b) Stitching-Ergebnisse unter Anwendung der „SmartStitching“ Software

Abbildung 3.24: Stitching-Ergebnisse im Vergleich

Die Stitching-Ergebnisse sind in Abbildung 3.24 sowohl in der 3D-Darstellung als auch in der Schnittdarstellung gezeigt. Die in Abbildung 3.24b dargestellten experimentellen Ergebnisse unter Anwendung der „SmartStitching“ Software bestätigen, dass die negativen Schereneffekte, wie sie bei der Verwendung des MountainsMap®-Stiching-Moduls vorkommen, nicht auftreten. In den Abbildung 3.24a und b ist jeweils ein Vertikalprofilverlauf (Schnittansicht) dargestellt, um signifikante Verbesserungen der Stitching-Ergebnisse der „SmartStitching“ Software in unterschiedlichen Bereichen zu verdeutlichen. Der Vorteil besteht darin, dass bei der Software „SmartStitching“ im Vergleich zu der kommerziellen Software MountainsMap® die Messwerte entsprechend ihres Rasterabstandes vom Überlappungsbereich bei der Interpolation gewichtet werden, so dass ein gleitender Übergang entsteht. Das bestätigt einen signifikanten Erfolg der „SmartStitching“ Software bei der Anpassung der Interpolation.

Wie sich in den Ergebnissen zeigt, ist der Einsatz der Stitching-Software „SmartStitching“ zweckmäßig (qualitativ ausreichend) zum Stichen von Messdaten der Topographie der Teilbereiche (Subaperturen) mit ringförmiger Form. Die Stitching-Software

„SmartStitching“ ist für das speziell selbstentwickelte und bereits eingeführte Messsystem gut geeignet bzw. entsprechend angepasst.

## 3.6 Kapitelzusammenfassung

In Kapitel 3 wurden das Funktionsprinzip und der Messaufbau des Subapertur-Stitching-Verfahrens zur Topographiemessung der Raumspiegelecken der NPM-Maschinen erläutert. Um die Messung kompletter Messflächen der Referenzspiegel der NPMM-200 unter Beibehaltung der Messauflösung und -genauigkeit zu realisieren, wurde in diesem Kapitel ein mit einem kleinflächig messenden Fizeau-Interferometer (6 Zoll Zygo-GPI-Interferometer) ausgestattetes Messsystem zur Topographiemessung für große Messbereiche von 300 mm x 300 mm vorgestellt. Da bei diesem Verfahren die Unebenheiten des Referenzspiegels direkt in das Messergebnis eingehen, wurden diese durch eine absolute Kalibrierung ermittelt und später zur Korrektur verwendet, um die sich von Messfeld zu Messfeld akkumulierenden systematischen Abweichungen zu minimieren. Darüber hinaus wurden Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels des verwendeten Interferometers sowohl in horizontaler Messrichtung als auch in vertikaler Messrichtung detailliert erläutert. Durch den beschriebenen Kalibriervorgang wurde die vollständige Oberflächentopographie der Referenzplatte hochpräzise bestimmt. Die erzielten Ergebnisse rechtfertigen den Einsatz der absoluten Kalibrierung der Referenzplatte des Interferometers. Die Genauigkeit der Topographiemessungen wurde dadurch signifikant erhöht.

Um die aufgenommenen Datensätze (Subtopographien) zu einer gesamten Topographie erfolgreich zu rekonstruieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine speziell entwickelte Stitching-Software „SmartStitching“ eingesetzt. Wie sich aus den Ergebnissen ergibt, ist der Einsatz der Stitching-Software „SmartStitching“ qualitativ ausreichend zum Stitchen von Messdaten der Subaperturen.

Die Untersuchungen in diesem Kapitel sind insgesamt von großer Bedeutung für die gesamte Arbeit, da hier das grundlegende Messprinzip des Subapertur-Stitching-Verfahrens für großflächige Topographiemessung der Raumspiegelecken der NPMM-200 detailliert erklärt ist. Im folgenden Kapitel wird zuerst die Topographiemessung einer NMM-1-Raumspiegelecke detailliert beschrieben und anschließend werden die Messergebnisse ausgewertet und analysiert.

## 4 Topographiemessung einer Raumspiegelecke der NMM-1

### 4.1 Raumspiegelecke der NMM-1

Die erste Generation der Raumspiegelecke der NMM-1 setzt sich aus drei einzelnen Spiegelplatten zusammen, einer Grundplatte (75 mm x 75 mm x 20 mm) und zwei angesprengten Seitenplatten (40 mm x 40 mm x 20 mm, vgl. Abbildung 4.1a). Auf den Außenseiten der drei Spiegelplatten befindet sich jeweils eine Messspiegelfläche. Die Größe der Messspiegelfläche beträgt 30 mm x 30 mm für den z-Spiegel und 30 mm x 15 mm für den x- und den y-Spiegel (vgl. Abbildung 4.2). Die erste Raumspiegelecke besteht aus Borosilikat-Kronglas (BK7). Um minimale temperaturbedingte Ausdehnungen zu garantieren, wurden die nachfolgenden Raumspiegelecken aus Zerodur<sup>®</sup> gefertigt (vgl. Abbildung 4.1b). Dieses Material weist „einen verschwindend kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und eine hervorragende Homogenität dieses Koeffizienten im gesamten Keramikblock“ auf. [69, 74, 75].

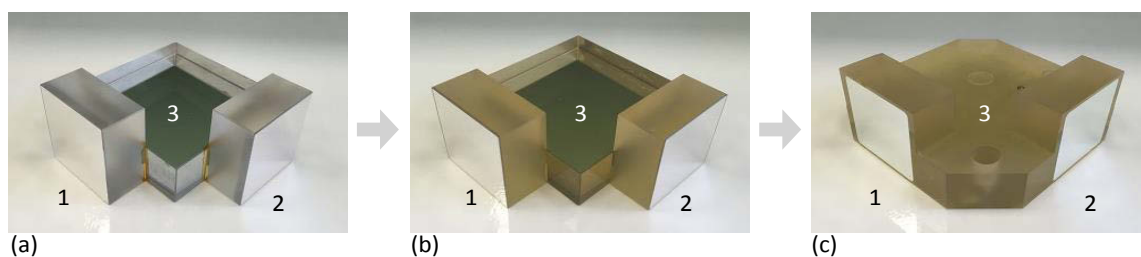


Abbildung 4.1: Spiegelecken von NMM-1: (a) Raumspiegelecke aus BK7, (b) Raumspiegelecke aus Zerodur<sup>®</sup> mit angesprengten Seitenspiegeln, (c) Raumspiegelecke aus Zerodur<sup>®</sup>, monolithische Bauform (1 x-Messspiegel, 2 y-Messspiegel, 3 Grundplatte, auf der Rückseite der Tragplatte befindet sich der z-Spiegel)

Die Messunsicherheit der NMM-1 wurde durch die ansonsten baugleiche Raumspiegelecke aus Zerodur® verbessert [45]. In der NMM-1 liegt diese Raumspiegelecke mit angesprengten Seitenspiegeln auf den in der Abbildung 4.2a gold eingefärbten mechanischen Bauelementen auf vier Auflageflächen (jeweils 8 mm x 8 mm). Drei von diesen vier Ecken werden durch ein weiches Gummi-Pad leicht geklemmt.

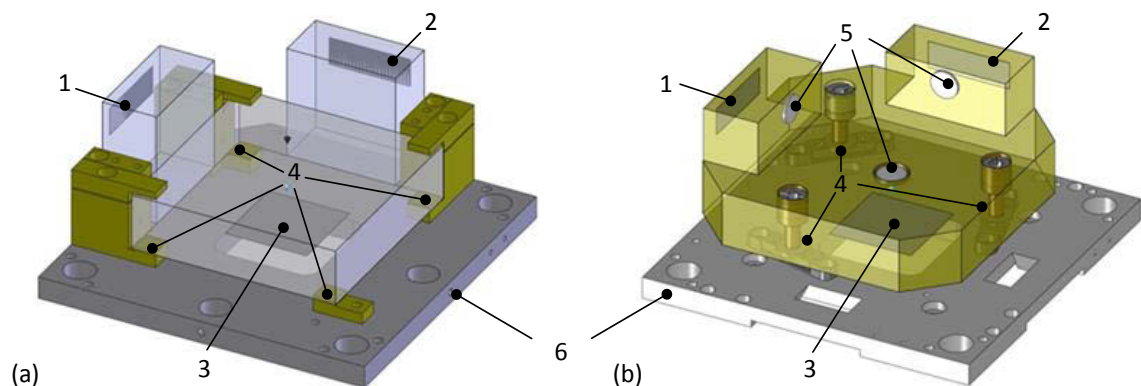


Abbildung 4.2: Raumspiegelecke im Einbauzustand: (a) Raumspiegelecke aus BK 7 oder Zerodur® mit angesprengten Seitenspiegeln (1 y-Messspiegel, 2 x-Messspiegel, 3 z-Messspiegel, 4 Auflagepunkte), (b) Raumspiegelecke aus Zerodur® mit monolithischer Bauform (1 y-Messspiegel, 2 x-Messspiegel, 3 z-Messspiegel, 4 Auflagepunkte, 5 Planparallelplatten, 6 Grundplatte)

Wegen der Integration einer verbesserten Gewichtskraftkompensation wurde die Raumspiegelecke und deren Befestigung geändert [73]. Abbildung 4.1c zeigt die neu konstruierte Raumspiegelecke der NMM-1. Den Unterschied in Bezug auf den bisherigen Aufbau macht die Bauform der Raumspiegelecke aus. Diese Raumspiegelecke besteht aus nur einem Körper (monolithische Bauform) und wurde aus Zerodur® hergestellt. Sie wurde an drei Auflagepunkten auf der Grundplatte befestigt (vgl. Abbildung 4.2b). Die Auflagepunkte sind auf einem Kreis um jeweils 120° symmetrisch um den Schwerpunkt der Raumspiegelecke angeordnet. Im Vergleich zu den beiden anderen Varianten erfolgt die Lagerung dieser Raumspiegelecke nun statisch bestimmt an drei Auflagepunkten. Um die Verdrehung um die vertikale z-Achse und die Zwangsfreiheit bei Temperaturänderungen gewährleisten zu können, wurde die Verbindung zwischen der Raumspiegelecke und der Grundplatte mit drei V-Nut-Kugel-Paarungen modifiziert [73].

Die drei Normalenvektoren der Messspiegelflächen der Raumspiegelecke dienen als Referenzkoordinatensystem in der NPM-Maschine. Die Präzision der NPM-Maschine hängt wesentlich von der Kenntnis der topographischen Eigenschaften der Raumspiegelecke ab. Diese müssen daher unbedingt ermittelt werden. Die Stabilität und die Unsicherheit der Topographiedaten bestimmen unmittelbar die Leistungsfähigkeit der Korrekturmodelle der NPM-Maschinen. Die Ebenheiten der Messflächen der



Raumspiegelecke wurden mit  $\lambda/20$  und die Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Messflächen  $< 2''$  spezifiziert [44].

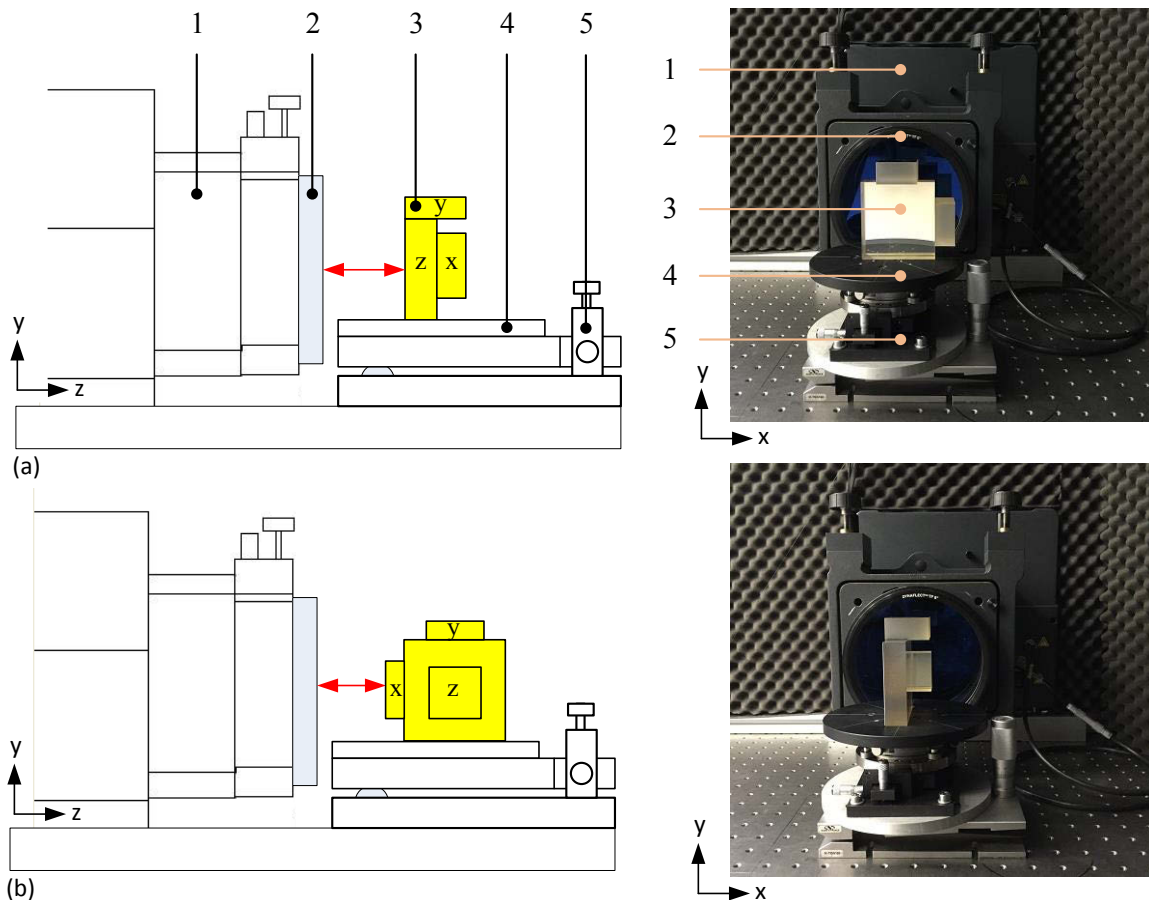


Abbildung 4.3: Horizontaler Prüfaufbau mit Zygo-Interferometer für Topographiemessung der NMM-1-Raumspiegelecke vor dem Einbau: (a) Horizontaler Prüfaufbau für z-Spiegelmessung, (b) Horizontaler Prüfaufbau für x-/ y-Spiegelmessung (1 Phasenschiebe-Interferometer, 2 Referenzspiegel des Interferometers, 3 Raumspiegelecke, 4 Tragplatte, 5 Justage)

Daher wurden die Abweichungen zum Einbauzustand mit Hilfe von FEM-Analysen untersucht. Die errechneten Winkelabweichungen zwischen den Lagen betragen höchstens  $0,03''$  und sind damit nicht signifikant. Die maximalen resultierenden Formabweichungen der einzelnen Spiegelflächen ergeben  $0,5 \text{ nm}$  für die z-Spiegelfläche und ca.  $0,05 \text{ nm}$  für die x- und y-Spiegelfläche [51, 73]. Der Einfluss von Deformationen beim Einbau der Spiegelecke wurde bei der FEM-Analyse jedoch nicht berücksichtigt. Deshalb ist es notwendig, dass die einzelne Spiegelfläche der Raumspiegelecke im eingebauten Zustand mit der geforderten Genauigkeit präzise vermessen wird, um die durch die Änderung der Lagerbedingungen entstehende Formänderung messtechnisch zu bestimmen und ggf. das Korrekturpolynom anschließend zu berichtigen.



## 4.2 Messprozess für Topographiemessung einer NMM-1-Raumspiegelecke

Der Einbau der gemessenen Raumspiegelecke in die NMM-1 zieht bei der alten Bauform infolge der Klemmungen Lageänderungen nach sich, wodurch die Ergebnisse unter realen Bedingungen von der FEM-Berechnung abweichen können [45]. Um die Abweichungen im montierten Zustand zu ermitteln, wurde die Raumspiegelecke im Rahmen dieser Arbeit in einem Einbauzustand gemessen, der dem tatsächlichen eingebauten Zustand in der NMM-1 sehr nahe kommt. Der Aufbau und die prinzipielle Funktionsweise des Messsystems zur Topographiemessung wurden im vorherigen Kapitel 3.1 beschrieben. Wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, wurden die Topographiemessungen der x-/ y-Spiegelfläche der NMM-1-Raumspiegelecke aufgrund ihrer kleinen Messflächen mit dem Aufbau, ohne die Notwendigkeit eines Stitchings, direkt durchgeführt.

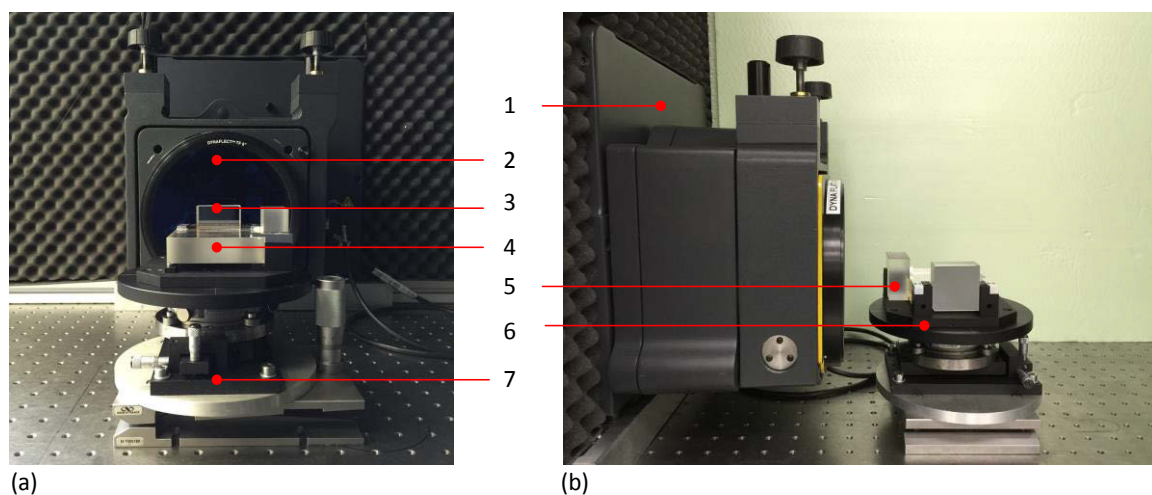


Abbildung 4.4: Horizontaler Prüfaufbau mit dem Zygo-Interferometer für Topographiemessung der x-/ y-Spiegelfläche der NMM-1-Raumspiegelecke im näherungsweisen Einbauzustand bezüglich der NMM-1: (a) Horizontaler Prüfaufbau für y-Spiegelvermessung: Rückansicht, (b) Horizontaler Prüfaufbau für x-Spiegelvermessung: Seitenansicht (1 GPI-XP-Interferometer der Firma Zygo, 2 Referenzspiegel des Interferometers, 3 y-Spiegel, 4 Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln, 5 x-Spiegel, 6 Auflageplatte der Raumspiegelecke, 7 Justage)

Das Zentrum der untersuchten Fläche lag auf der optischen Achse. Die stufenlose feinfühligke 3-Achsen-Justage des Spiegelträgers ermöglicht eine schnelle und exakte Ausrichtung der x-/ y-Spiegelfläche der Spiegelecke parallel zum Referenzspiegel. Der Hersteller gibt als Maß für die maximal zulässige Verkipfung der Messfläche 20 Interferenzstreifen an. Darüber hinaus sind die Messergebnisse nicht mehr vertrauenswürdig [107]. Der Grund dafür ist, dass der mathematische Auswertalgorithmus des Analyseprogramms fehlerbehaftet ist, sobald mehrere Fizeau-Interferenzstreifen analysiert werden [99]. Dabei ist zu beachten, dass der Abstand

zwischen Referenzfläche und Messfläche so klein wie möglich gehalten werden sollte, um umgebungsbedingte Störeinflüsse zu minimieren [99]. Die Messungen wurden auf einem Labortisch innerhalb einer Messhaube durchgeführt, um Umgebungseinflüsse zu minimieren. Für jeden einzelnen Spiegel wurden je zehn Messungen durchgeführt.

Der vertikale Prüfaufbau zur Bestimmung der Topographie der z-Spiegelfläche im Einbauszustand ist in der Abbildung 4.5 dargestellt. Im Unterschied zur Topographiemessung der x-/ y-Spiegelfläche wurde beim vertikalen Versuchsaufbau zusätzlich ein Mux mit Umlenkspiegel verwendet, wie bereits bei dem Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels in vertikaler Messrichtung (vgl. Kapitel 3.4). Der Phasenschieber des Interferometers wurde direkt an der Oberseite vom Mux montiert, so dass die Unebenheit des Umlenkspiegels die Messergebnisse unbeeinflusst lässt. In diesem Fall wurde dieser negative Einfluss der Unebenheit des Umlenkspiegels im Messbereich durch Vor- und Rückwärtsgang der Laserstrahlen an der gleichen Stelle des Umlenkspiegels kompensiert.

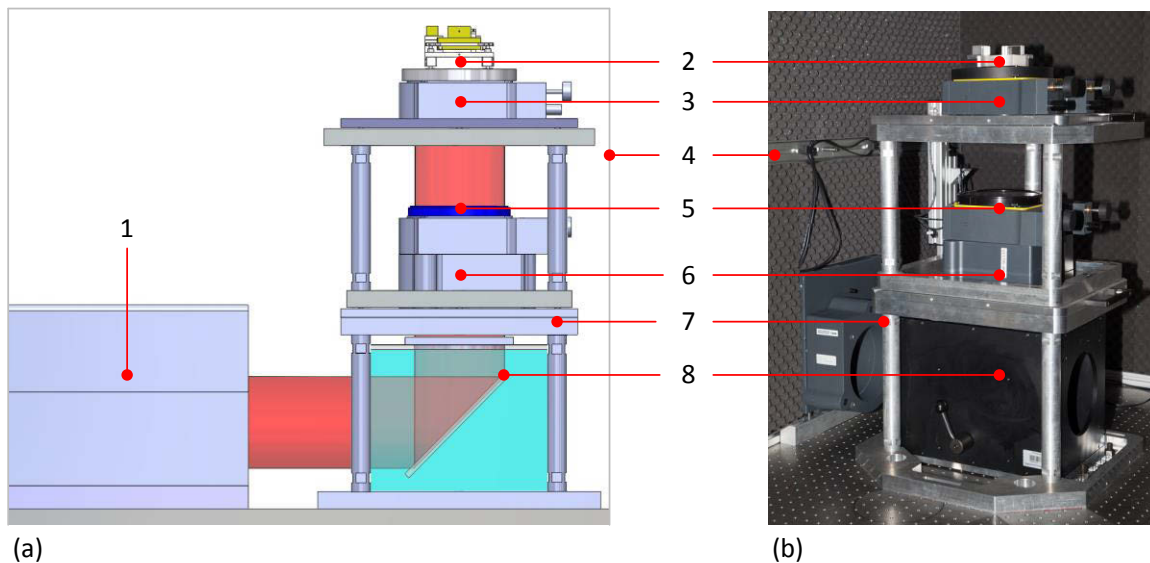


Abbildung 4.5: Vertikaler Prüfaufbau mit Zygo-Interferometer für die Topographiemessung der z-Spiegelfläche der NMM-1-Raumspiegelecke im näherungsweisen Einbauszustand: (a) CAD-Modell des Prüfaufbaus: Seitenansicht, (b) Foto des Prüfaufbaus (1 GPI-XP-Interferometer der Firma Zygo, 2 Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln, 3 Justage, 4 Schutzhäube, 5 Referenzspiegel des Interferometers, 6 Phasenschieber, 7 Gestelle inkl. Tragplatten, 8 Mux mit 90°-Umlenkspiegel)

### 4.3 Auswertung und Analyse der Messwerte

Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, befindet sich auf den Außenseiten der drei Spiegelplatten jeweils eine definierte Messspiegelfläche (Funktionsbereich) der NMM-1. Um einen Randeffekt (Beugung) zu erkennen, müssen die Abmessungen der zu untersuchende Messfläche jeweils 2,5 mm an jedem Rand größer sein, als die der verwendeten Messspiegelfläche der Raumspiegelecke. In diesem Fall beträgt die Größe der zu untersuchende Messfläche 30 mm x 10 mm für x- und y-Spiegel und 30 mm x 30 mm für den z-Spiegel. Um Position und Größe der Messfläche gezielt zu bestimmen, wird unter Zuhilfenahme der verwendeten Bildbearbeitungssoftware MetroPro® ein maskengestütztes Verfahren eingesetzt. Dabei sind sowohl die komplette Spiegelfläche als auch die definierte Messspiegelfläche der NMM-1 auswertbar.

#### x- und y-Spiegelfläche

Die aus 10 wiederholten Messungen gemittelten Topographien der kompletten Fläche des y-Spiegels ohne und mit Korrektur systematischer Abweichungen sind in Abbildung 4.6a und c dargestellt. Die Differenz beider PV-Werte beträgt lediglich 0,6 nm bzw. bei den RMS-Werten 0,01 nm.

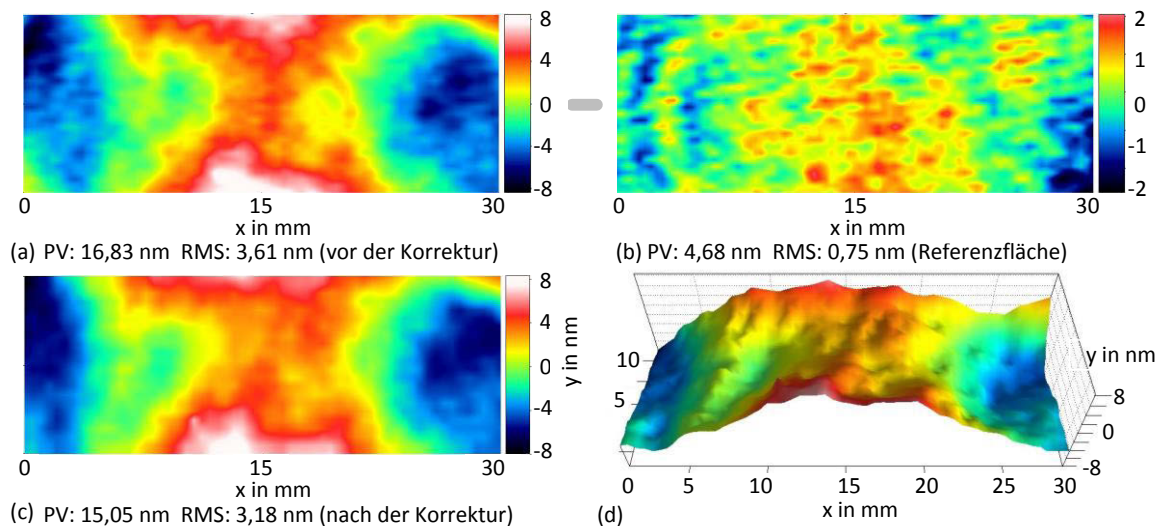


Abbildung 4.6: Darstellung von Messergebnissen der y-Spiegelfläche der Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln: (a) Ergebnis der zu verwendenden Messspiegelfläche mit einer Größe von 30 mm x 10 mm, ohne Korrektur systematischer Abweichungen, (b) Ebenheitsabweichung der verwendeten Referenzplatte (Platte C) im Messbereich (systematische Abweichungen des Interferometers), (c) Ergebnis der zu verwendenden Messspiegelfläche mit einer Größe von 30 mm x 10 mm, mit Korrektur systematischer Abweichungen, (d) 3D-Darstellung des Ergebnisses

Wie die Ergebnisse zeigen, ist die Auswirkung der Formabweichung der Referenzfläche des Interferometers im Messbereich auf das Ergebnis kaum zu erkennen. Der Grund dafür ist, dass die Formabweichung der verwendeten Referenzplatte (Platte C) des Interferometers im Messbereich (Größe: 30 mm x 10 mm) sehr gering ist (Messfläche: 15,05 nm PV, Referenzfläche der Platte C im verwendeten Feld: 4,68 nm PV, vgl. Abbildung 4.6). Diese Werte liegen unterhalb der geforderten Fertigungstoleranzen (Formabweichung von  $\lambda/20$ ). Unter Einhaltung der entsprechenden Messbedingungen sind die Messergebnisse aus Wiederholmessungen mit einer Standardabweichung von  $< 0,08$  nm PV ( $< \lambda/6000$ ) reproduzierbar.

Die gemittelte Topographie der Messspiegelfläche des x-Spiegels mit Korrektur systematischer Abweichungen ist in Abbildung 4.7 dargestellt und weist eine ähnliche Formabweichung auf wie die y-Spiegelfläche. Für diesen Fall beträgt der experimentell ermittelte PV-Wert 17,72 nm und der RMS-Wert 3,88 nm.

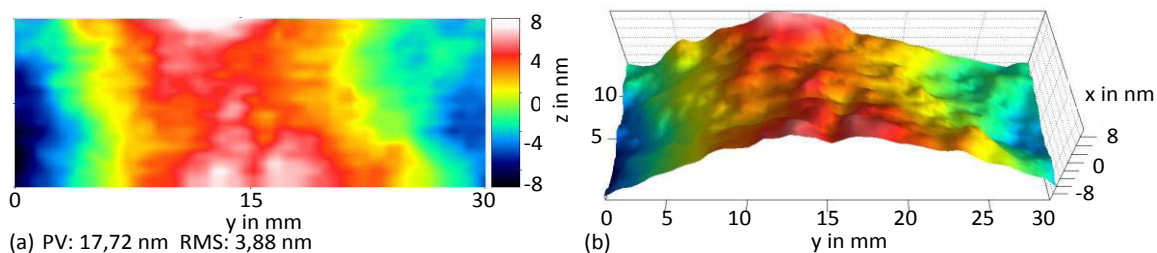


Abbildung 4.7: Darstellung von Messergebnissen der x-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln: (a) Ergebnis der zu verwendenden Messspiegelfläche mit einer Größe von 30 mm x 10 mm, (b) 3D-Darstellung des Ergebnisses

#### **Vergleich der Messergebnisse der y-Messspiegelfläche bei unterschiedlichen Lagerbedingungen (vor und nach dem Einbau der Raumspiegelecke)**

Um die Abhängigkeit der Verformungswerte von den Lagerbedingungen festzustellen, wurde die Raumspiegelecke im Rahmen dieser Arbeit sowohl vor dem Einbau (vgl. Abbildung 4.3) als auch im eingebauten Zustand (vgl. Abbildung 4.4) gemessen.

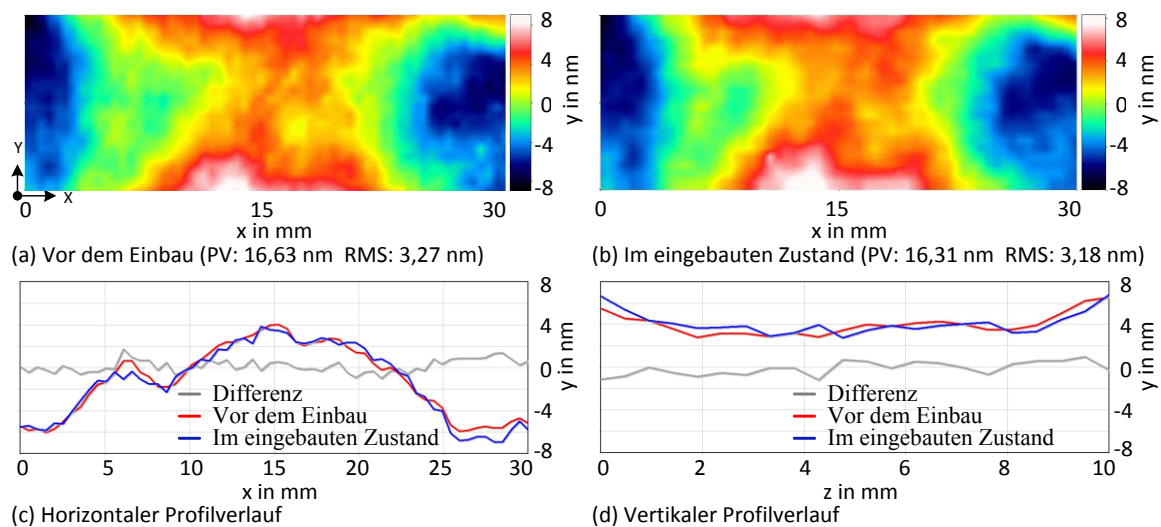


Abbildung 4.8: Vergleich der Messergebnisse der y-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke bei unterschiedlichen Lagerbedingungen (vor und nach dem Einbau der Raumspiegelecke)

In Abbildung 4.8 sind beide Messungen der y-Spiegelfläche der Raumspiegelecke als topografische Falschfarben-Grafik zum direkten Vergleich dargestellt. Sowohl die topographische Darstellung als auch die Profilverläufe zeigten insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Ergebnissen. Es kann festgestellt werden, dass die Lageänderungen und Klemmungen durch Einbau der Raumspiegelecke in der NMM-1 nur zu einer Topographieabweichung der y-Messspiegelfläche von  $< 0,3$  nm PV führt. Dies entspricht dem erwarteten Ergebnis der FEM-Berechnung. Die Messung wurde auch für die x-Messspiegelfläche durchgeführt und führte zu ähnlichen Ergebnissen. Damit ist die Deformation durch die unterschiedlichen Einbaulagen der x- bzw. y-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke kaum signifikant und kann daher vernachlässigt werden.

### z-Spiegelfläche

In Abbildung 4.9 sind die gemittelten Topographien der z-Messspiegelfläche aus 10 Wiederholungsmessungen ohne und mit Korrektur systematischer Abweichungen zu sehen. Wie bei der Topographiemessung der x- und y-Messspiegelfläche hat die Formabweichung der Referenzfläche des Interferometers im Messbereich (Größe: 30 mm x 30 mm) keine signifikante Auswirkung auf das Messergebnis. Dabei beträgt die Formabweichung der verwendeten Referenzplatte (Platte C) des Interferometers, die bereits mit dem selben Aufbau nach dem Drei-Platten-Test zur flächenhaften Absolutprüfung in vertikaler Richtung kalibriert wurde (vgl. Kapitel 3.4), nur lediglich 4,09 nm ( $\lambda/150$ ) PV (vgl. Abbildung 4.9b). Der experimentell ermittelte PV-Wert aus 10 aufeinander folgenden Messungen mit Korrektur systematischer Abweichungen beträgt 14,35 nm und der RMS-Wert 2,47 nm. Im eingebauten Zustand liegt die Spiegelecke auf vier Ecken der Tragplatte (vgl. Abbildung 4.2a). Die Gravitation wirkt direkt auf die z-Messspiegelfläche in



Richtung der negativen z-Achse. Wie aus Abbildung 4.9c zu entnehmen ist, führt der Lastfall zu einer Durchbiegung der z-Messspiegelfläche in Form einer Durchbiegung. Um dies anschaulich zu verdeutlichen, sind in Abbildung 4.9d sowohl der horizontale als auch der vertikale Profilverlauf übereinandergelegt und dargestellt worden. Die Durchbiegung ist in beiden Richtungen näherungsweise gleich groß. Die maximale Durchbiegung des Profils beträgt ca. 12 nm.

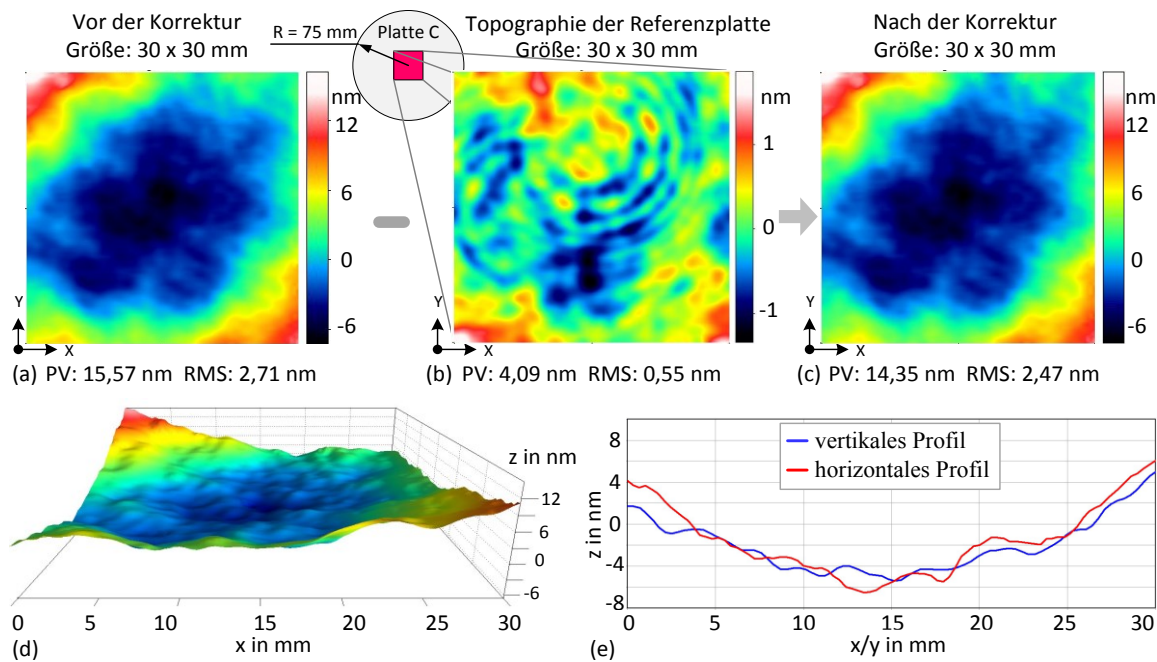


Abbildung 4.9: Darstellung von Messergebnissen der z-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln (Ansicht des Zygo-Interferometers): (a) Ergebnis der Messspiegelfläche des z-Spiegels ohne Korrektur systematischer Abweichungen, (b) Topographie der verwendeten Referenzplatte (Platte C) im Messbereich (systematische Abweichungen des Interferometers), (c) Ergebnis der Messspiegelfläche des z-Spiegels mit Korrektur systematischer Abweichungen, (d) 3D-Darstellung des Ergebnisses von Bild c, (e) Darstellung der Profileverläufe

Im Vergleich zur Messung der x- und y-Messspiegelfläche ist die Reproduzierbarkeit bei der Messung der z-Messspiegelfläche deutlich schlechter geworden. In diesem Fall beträgt die Standardabweichung der zehn Wiederholmessungen 0,12 nm PV und ist damit etwa 50 % größer als der Wert bei der Messung der x- und y-Messspiegelfläche. Der Grund dafür ist, dass der Abstand zwischen Referenzfläche und zu messender Fläche bei der Messung der z-Messspiegelfläche wegen des erweiterten Messaufbaus mehr als doppelt so groß wie bei der Messung der x- und y-Messspiegelfläche ist. Je größer dieser Abstand ist, desto größer ist auch der Einfluss der Messbedingungen. Eine Messabweichungsuntersuchung bezüglich des Abstandes und ihrer Einflüsse werden in Kapitel 8.1 beschrieben.

### Vergleich der Messergebnisse der z-Messspiegelfläche bei unterschiedlichen Lagerbedingungen (vor und nach dem Einbau der Raumspiegelecke)

In den Abbildung 4.10a und b ist sowohl die vor dem Einbau gemessene Topographie der z-Spiegelfläche, als auch die nach dem Einbau gemessene Topographie zum Vergleich dargestellt. Die Unterschiede zwischen beiden Messergebnissen sind marginal ( $\Delta PV = 2,18 \text{ nm}$ ,  $\Delta RMS = 0,06 \text{ nm}$ ). Sie sind aber in der grafischen Darstellung zu erkennen. Aus den beiden Ergebnisbildern wurde die Differenz berechnet. Diese ist in Abbildung 4.10c und d sowohl in Falschfarben-Darstellung als auch in 3D-Darstellung zu sehen. Der PV-Wert der Differenz beträgt  $9,37 \text{ nm}$  und der RMS-Wert  $1,49 \text{ nm}$ . Wie der Abbildung 4.10e zu entnehmen ist, befindet sich die maximale Abweichung zwischen den Ergebnissen im Randbereich der z-Messspiegelfläche. Der Grund dafür ist, dass im Randbereich die Auswirkung von den Lagerbedingungen stark ausgeprägt ist. Diese durch FEM-Analyse von Koch [51] prognostizierte Auswirkung der Lagerbedingungen auf die Topographie der z-Messspiegelfläche konnte damit in den experimentellen Untersuchungen bestätigt werden.

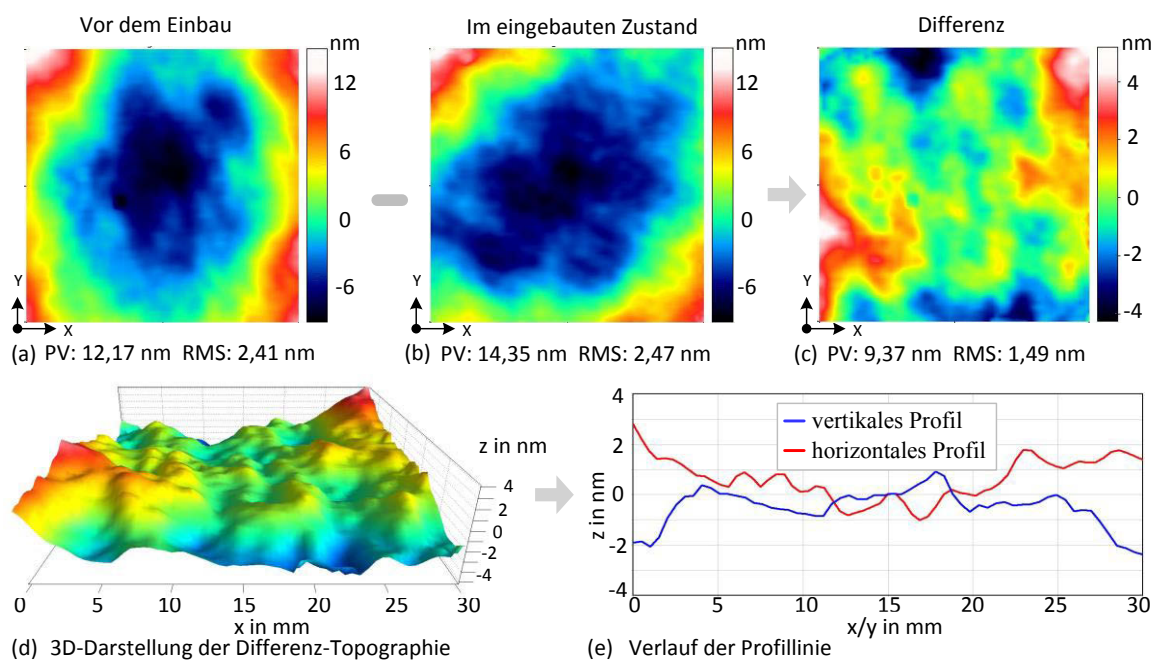


Abbildung 4.10: Vergleich der Messergebnisse der z-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke bei unterschiedlichen Lagerbedingungen (vor und nach dem Einbau der Raumspiegelecke)

Anhand der Vergleiche kann festgestellt werden, dass die summierten Auswirkungen (Lageänderungen, Klemmungen und Gravitationseffekt) durch Einbau der Raumspiegelecke in die NMM-1 zu einer signifikanten Verformung der z-Messspiegelfläche von ca.  $10 \text{ nm}$  PV führt. Dies übertrifft das Ergebnis der FEM-Berechnungen ( $< 3 \text{ nm}$  PV) um das 3-fache. Die Ursache für diese Abweichung zwischen

den Ergebnissen der theoretischen und praktischen Prüfungen liegt im Wesentlichen in einer überbestimmten Befestigung der Raumspiegelecke der alten Bauform im eingebauten Zustand. In diesem Fall wurde die Raumspiegelecke an den vier Eckpunkten der Auflageplatte jeweils auf Flächen von  $8 \times 8 \text{ mm}^2$  gelegt und nur drei von diesen vier Ecken wurden leicht geklemmt (vgl. Abbildung 4.2a). Diese überbestimmte Befestigung führt zu zusätzlichen Deformationen der z-Messspiegelfläche [45]. Im Gegensatz zur realen Situation wurden bei der FEM-Analyse alle vier Eckpunkte in z-Richtung festgehalten. Die Größe der Durchbiegung und die damit verbundene Formänderung der z-Messspiegelfläche hängt somit von ihrer realen Lage im Raum und den Lagebedingungen ab, so dass die interferometrisch vermessene z-Messspiegelfläche nur bedingt mit den numerisch berechneten Werten mittels FEM-Simulationsmodell verglichen werden kann. Die erzielten Ergebnisse rechtfertigen den Einsatz der absoluten interferometrischen Messung in vertikaler Richtung zur Korrektur der tatsächlichen Formabweichung der z-Messspiegelfläche im eingebauten Zustand.

Nachdem die Raumspiegelecke in die NMM-1 eingebaut wurde, wurden bei den Positionierungen und Messungen die drei senkrecht zueinander stehenden Messspiegelflächen der Raumspiegelecke als Koordinatensystem angenommen. Somit werden die erfassten Topographiedaten der x-, y- und z-Messspiegelflächen als bekannte systematische Abweichungen von der Echtzeitsteuerung der NMM-1 zur Korrektur der Messwerte verwendet. Um kurzzeitige Formabweichungen (z. B. Sprünge in den Messwerten, Rauschen der Messwerte) zu vermeiden, wird ein Polynomansatz dritter Ordnung für die Korrektur der Messwerte der Messspiegelflächen vorgeschlagen [45]. Die Korrekturdaten der x-, y- und z-Messspiegelflächen einer BK7-Raumspiegelecke mit angesprengten Seitenspiegeln sind im Anhang A sowohl in Falschfarben-Darstellung als auch in 3D-Darstellung dargestellt. Nachdem ein Korrekturpolynom aus den x-, y- und z-Messspiegelflächen gebildet wurde, wurden die Koeffizienten der Polynome in die Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1 übertragen.

## 4.4 Einfluss der Gewichtskraft auf die z-Spiegelplatte der Raumspiegelecke

In der NMM-1 ist die Raumspiegelecke indirekt im z-Antrieb integriert. Jedem z-Antrieb ist eine Einheit zur Gewichtskraftkompensation zugeordnet [45]. Durch die verwendete Gewichtskraftkompensation ist die automatische Anpassung an bewegte Massen (die gesamte Masse des Messobjekts, der Tragplatte und der Raumspiegelecke) in vertikaler Richtung der NMM-1 bis zu 1 kg geeignet [73]. Die gesamte Masse der Tragplatte und der



Raumspiegelecke beträgt ca. 500 g. In diesem Fall darf ein Maximalgewicht des Messobjekts (max. zulässige Last) auf der Raumspiegelecke der NMM-1 von 500 g nicht überschritten werden. Um den Einfluss der Messobjektmasse auf die Raumspiegelecke zu ermitteln, wurden im Rahmen dieser Arbeit zahlreiche Untersuchungen zu unterschiedlichen Gewichtsklassen zwischen 125 g und 500 g durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde eine Raumspiegelecke aus Zerodur® mit monolithischer Bauform eingesetzt (vgl. Abbildung 4.11a). Die neue Konstruktion bietet den wesentlichen Vorteil, dass die Lagerung der Spiegelecke nun statisch nicht überbestimmt an drei Auflagepunkten erfolgt. Dadurch konnte sowohl die mechanische als auch die thermische Stabilität erhöht werden. Deshalb ist diese Raumspiegelecke speziell für Langzeituntersuchungen geeignet. Die zu untersuchende Raumspiegelecke besitzt eine Tragplatte, auf der die Messobjekte zur Messung fixiert werden.

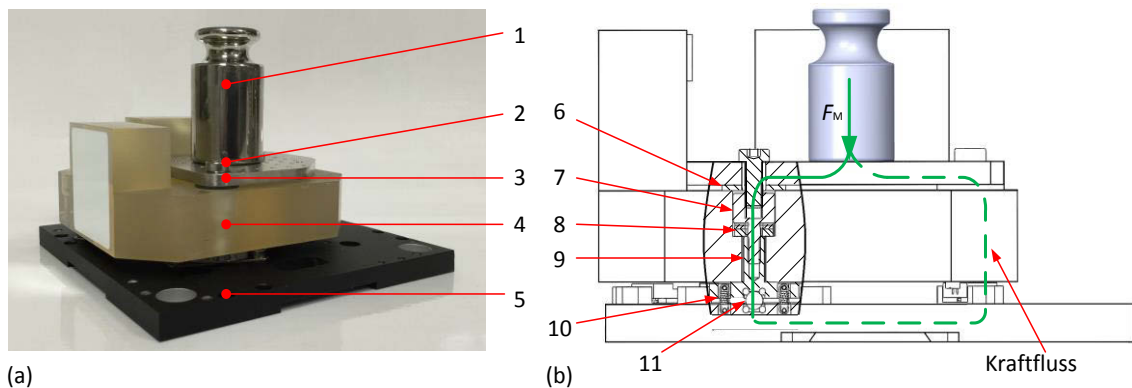


Abbildung 4.11: Lagerung der Raumspiegelecke bei der Untersuchung des Belastungszustands auf der z-Spiegelmessfläche: (a) Prüfaufbau (annähernd auf den tatsächlichen eingebauten Zustand in der NMM-1), (b) Prinzip der Lagerung und Kraftfluss (grün) (1 Gewicht als Messobjekt, 2 Befestigungsschraube, 3 Tragplatte für das Messobjekt, 4 Raumspiegelecke aus Zerodur® mit monolithischer Bauform, 5 Auflageplatte der Raumspiegelecke, 6 Unterlegscheibe aus Invar, 7 Befestigungsmutter, 8 Federelement, 9 Spiegelplattenhalter, 10 Zugfeder, 11 V-Nut-Kugelpaarung)

In Abbildung 4.11b sind das Prinzip der Lagerung und der Verlauf des Kraftflusses dargestellt. Für die Untersuchungen wurde eine 5 mm dicke Tragplatte aus Invar 36® benutzt, die auf drei dünnen Unterlegscheiben (um die drei Befestigungsbohrungen herum) auf der Oberseite der z-Spiegelplatte aufliegt. Das Gewicht liegt in der Mitte der Tragplatte. In diesem Fall liegen die Schwerpunkte des Messobjekts, der Tragplatte und der Raumspiegelecke übereinander auf der z-Achse. Im Vergleich zur Variante der Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln wird hier nur eine minimale Durchbiegung erreicht, weil die gesamte Gewichtskraft der Raumspiegelecke, der Tragplatte und des Gewichts  $F_M$  senkrecht und gleichmäßig über die Halter der Raumspiegelecke direkt in die z-Auflageplatte eingeleitet wird. Somit werden bei

schweren Messobjekten keine zusätzlichen Deformationen der Raumspiegelecke verursacht [45, 73].

Für die Untersuchungen des Einflusses der Gewichtskraft auf die Raumspiegelecke wurden insgesamt vier Messreihen mit bestimmten auf die Raumspiegelecke aufgelegten Gewichtsmassen (0 g, 125 g, 250 g, 500 g) aufgenommen. Bei den Untersuchungen wurde die Raumspiegelecke direkt in z-Richtung mittels des vertikalen Versuchsaufbaus gemessen, um die Topographieänderung der z-Spiegelfläche in einem Messbereich von 25 mm x 25 mm zu analysieren.

#### 4.4.1 Untersuchung der Kriechvorgänge der z-Spiegelplatte bei konstanter statischer Belastung

Häufige Probleme nach dem Messobjektwechsel (Lastwechsel) sind auftretende Kriecherscheinungen der Zerodurplatte der Raumspiegelecke. Eine Kriecherscheinung ist ein komplex isothermer, zeitabhängiger und irreversibler Verformungsprozess unter konstanter Belastung [93]. Um Kriecherscheinungen bei mechanischer Belastung, hier verursacht durch Messobjektwechsel, abschätzen und den Einfluss auf die Messunsicherheit bei einer konkreten Messung beurteilen zu können, wurden die z-Spiegelfläche der Raumspiegelecke nach dem Auflegen eines Gewichts in den ersten 12 Stunden alle zehn Minuten gemessen. Es wurden insgesamt 72 Messungen für jedes ausgewählte Gewicht durchgeführt. Hieraus lassen sich die Kriecherscheinungen durch das Auflegen eines neuen Gewichts ermitteln. Die Untersuchungen fanden bei näherungsweise konstantem Klima statt. Die Temperaturschwankung während der Dauermessung betrug weniger als  $\pm 0,2$  °C.

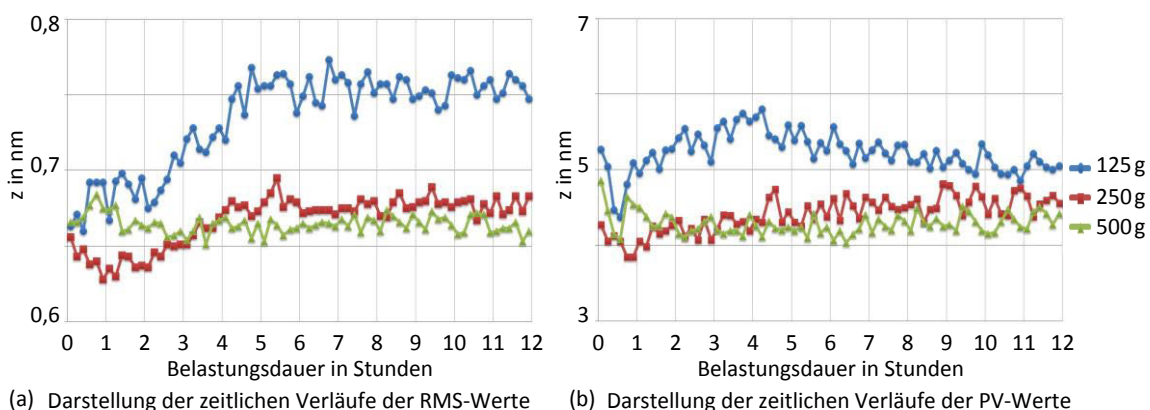


Abbildung 4.12: Auswertung der Untersuchung der Kriechvorgänge bei der konstanten statischen Belastung nach dem Aufstellen eines bestimmten Gewichts

In Abbildung 4.12 sind die zeitlichen Verläufe der RMS- und PV-Werte der z-Messspiegel aus den Dauermessungen innerhalb der ersten 12 Stunden nach dem Auflegen eines bestimmten Gewichts dargestellt. Die Punkte repräsentieren die ermittelten einzelnen Messwerte. Der Tendenz dieser Werte ist rein qualitativ zu entnehmen, dass diese Untersuchung nur im Zeitfenster bis 12 Stunden nach dem Aufstellen eines Gewichts durchgeführt werden müsste, da die Werte danach ausreichend stabil sind. In Abbildung 4.12 ist deutlich zu erkennen, dass je schwerer die auf die Raumspiegelecke aufgelegte Gewichtsmasse ist, umso geringere (kürzere) Kriecherscheinungen (Kriechvorgänge) in der Zerodurplatte bewirkt werden. Im schlechtesten Fall stieg der Wert nach dem Aufstellen eines 125 g Gewichts in den ersten 6 Stunden um 0,15 nm RMS bzw. 1,5 nm PV. Dagegen stieg der Wert nach dem Aufstellen eines 500 g Gewichtes im gleichen Zeitraum nur um 0,05 nm RMS bzw. 0,6 nm PV. Dieser Wert ist um ca. das 3-fache kleiner als der beim 125 g Gewicht. Tabelle 4.1 dient zur Veranschaulichung der Kriecherscheinungen in Abhängigkeit von der Zeit und der Gewichtsmasse. Als quantitative Angabe dient die Größe der Standardabweichung der ermittelten PV-Werte nach einer bestimmten Belastungsdauer (Zeitfenster I: 0 bis 6 Stunden und Zeitfenster II: 6 bis 12 Stunden) als Indikator für Kriechvorgänge.

Tabelle 4.1: Standardabweichung  $\sigma$  der PV-Messwerte in dem überwachten Zeitintervall (bezogen auf die Messdaten aus Abbildung 4.12a)

Masse \ Zeit	0 bis 6 Stunden	6 bis 12 Stunden
125 g	0,32 nm	0,15 nm
250 g	0,20 nm	0,13 nm
500 g	0,17 nm	0,12 nm

Aus der Tabelle 4.1 ist zu entnehmen, dass das „Kriechen“ für alle drei Fälle nur in den ersten 6 Stunden nach dem Aufstellen eines Gewichts eine starke Änderung der Werte bewirkt. Die zugehörige Standardabweichung  $\sigma$  variiert während dieser Zeitspanne zwischen den Werten 0,17 nm und 0,32 nm. Danach stabilisieren sich die Messwerte. In der Zeitspanne von 6 bis 12 Stunden reduziert sich die Standardabweichung deutlich auf Werte zwischen 0,12 nm und 0,15 nm. Dauerbelastungen durch Gewichte von einer Dauer von mehr als 6 Stunden verändern die bezogene Kriecherscheinung der Zerodurplatte der Raumspiegelecke kaum noch. Aus diesem Grund muss nach einem Messobjektwechsel an der NMM-1 vor dem Beginn einer neuen Messung mindestens 6 Stunden gewartet werden, um die zulässige Messunsicherheit von 0,1 nm zu erreichen. In der Praxis muss vor einer Messung mit der NMM-1 mehrere Stunden (normalerweise länger als 8 Stunden) auf das Erreichen einer konstanten Temperatur gewartet werden, um eine temperaturkonstante

Messung durchführen zu können. Das Kriechverhalten ist nach dieser Zeitspanne vernachlässigbar und bedarf keiner gesonderten Behandlung.

#### 4.4.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit unterschiedlichen Messobjektmassen

Nach der Untersuchung der Kriechvorgänge der z-Spiegelplatte über 6 Stunden wurden nochmals 10 Einzelmessungen (alle 10 Minuten) durchgeführt. Ziel war es, die Topographie der z-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke bei unterschiedlicher mechanischer Belastung, verursacht durch das unterschiedliche Gewicht, ohne Einfluss der Kriechvorgänge zu ermitteln. Die ermittelten Ergebnisse und die zugehörigen Korrekturwerte jeder einzelnen Messreihe sind im Anhang B detailliert dargestellt. Um mögliche auftretende örtliche Änderungen zu ermitteln, wurden die Differenzen (Differenz-Topographien) zwischen dem Ergebnis ohne Gewicht (0 g) und den Ergebnissen mit bestimmten Gewichtsmassen (125 g, 250 g, 500 g) berechnet und sind in Abbildung 4.13 in Falschfarben-Darstellung abgebildet.

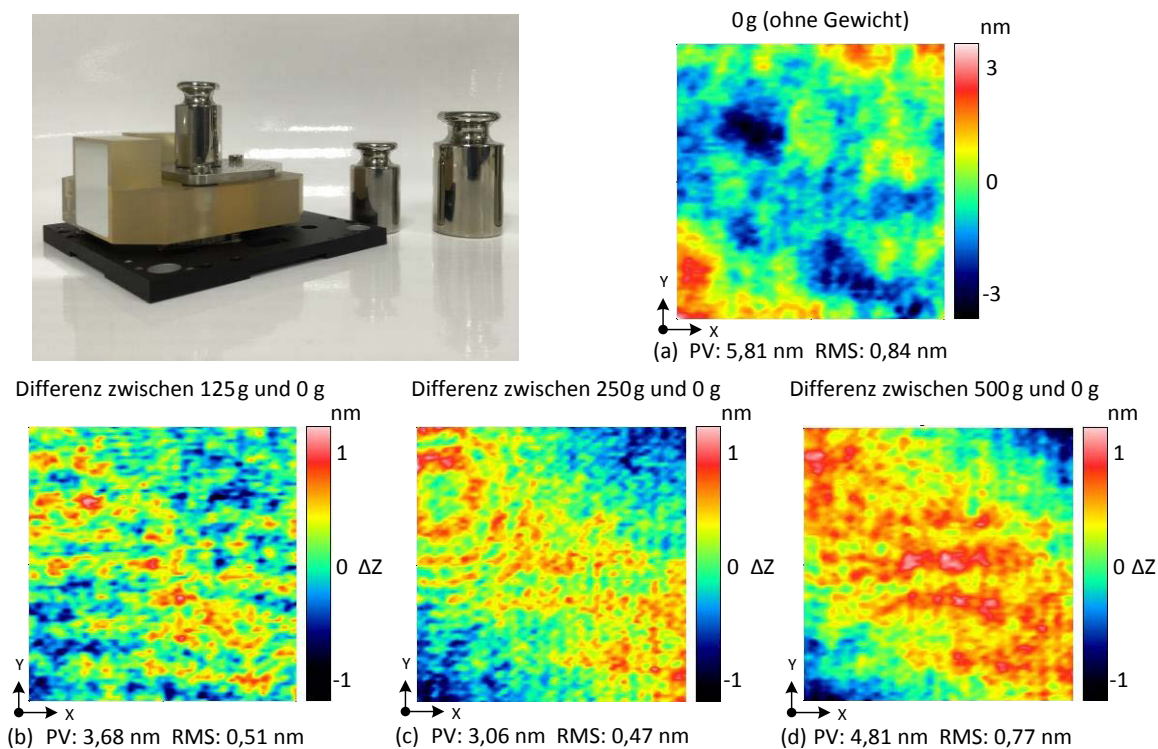


Abbildung 4.13: Differenzen (Differenz-Topographien) zwischen dem Ergebnis ohne Gewicht (0 g) und den Ergebnissen mit bestimmten Gewichtsmassen (125 g, 250 g, 500 g)

Wie in Abbildung 4.13 zu sehen ist, ändert sich die Topographie der z-Messspiegelfläche bei schweren Belastungen nur gering. Zwischen beiden Extremen (ohne Gewicht und mit

500 g Gewicht) ergibt sich lediglich eine maximale Abweichung von 4,81 nm PV bzw. 0,77 nm RMS. Um diese Unterschiede zu verdeutlichen, sind in Abbildung 4.14 sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Profilverläufe der in Abbildung 4.13 vorliegenden topographischen Ergebnisse übereinandergelegt dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass die größte örtliche Änderung am Rand der z-Messspiegelfläche auftritt.

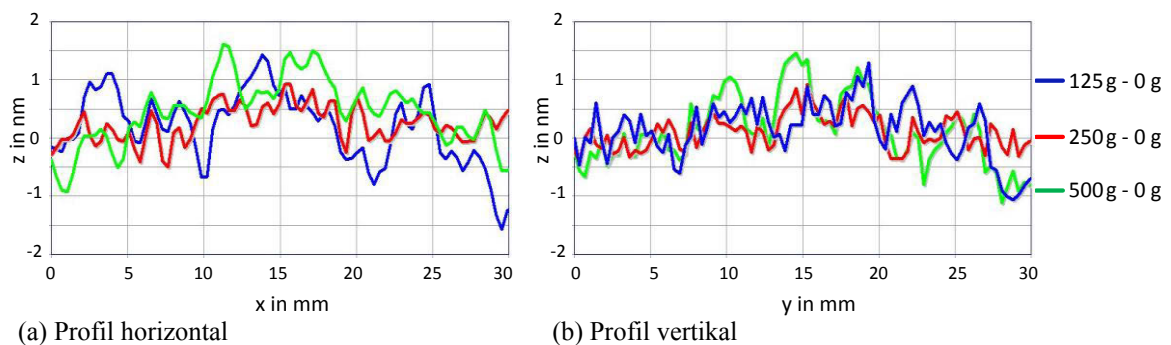


Abbildung 4.14: Darstellung der Profilverläufe der in Abbildung 4.13 vorliegenden topographischen Ergebnisse

Durch diese statischen Untersuchungen mittels bestimmter Gewichtsmassen konnte somit gezeigt werden, dass eine signifikante Verformung der z-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke aus Zerodur<sup>®</sup> mit monolithischer Bauform bei schweren Messobjekten bis zu 500 g kaum zu erkennen ist. Dadurch sind die spezifischen Anforderungen [73] an die neue Konstruktion der Raumspiegelecke erfüllt.

## 4.5 Kapitelzusammenfassung

In Kapitel 4 erfolgte die detaillierte Beschreibung des Messprozesses für Topographiemessungen an einer BK7-Raumspiegelecke der NMM-1. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen der x-, y- und z-Spiegelfläche der Raumspiegelecke wurden sowohl vor dem Einbau als auch im eingebauten Zustand durchgeführt. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass der Verformungswert der z-Messspiegelfläche im Vergleich zu den x- und y-Messspiegelflächen deutlich von den Lagerbedingungen abhängt. Es konnte gezeigt werden, dass die Spiegelflächen mit einer Messunsicherheit  $< 2$  nm ermittelt werden kann. Aus den Topographiedaten der Messspiegelflächen wurden die Koeffizienten der Korrekturfunktionen berechnet, um die Online-Korrektur von langwelligen Formabweichungen in der NMM-1 zu ermöglichen.

Schließlich wurden Untersuchungen von Kriechvorgängen bei unterschiedlicher Belastung präsentiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Lagerung der neuen Konstruktion eine hohe

Stabilität der z-Spiegelplatte, auch bei wechselnder mechanischer Belastung, insbesondere beim Messobjektwechsel besitzt.

## 5 Topographiemessung einer Raumspiegelecke der NPM-200

In [56] wurden verschiedene Varianten von Raumspiegelecken vorgestellt und nach verschiedenen Kriterien bewertet. Schlussendlich wurde die in Abbildung 5.1 dargestellte Form der Raumspiegelecke gewählt und fertigungstechnisch bei der Carl Zeiss Jena GmbH umgesetzt. Die für die NPM-200 mit einem Messbereich von  $200 \times 200 \times 25 \text{ mm}^3$  konzipierte Raumspiegelecke umfasst  $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$  und hat ein Gesamtgewicht von 7,6 kg. Das Design und die Konstruktion der Raumspiegelecke sind in [3, 45] ausführlich beschrieben.

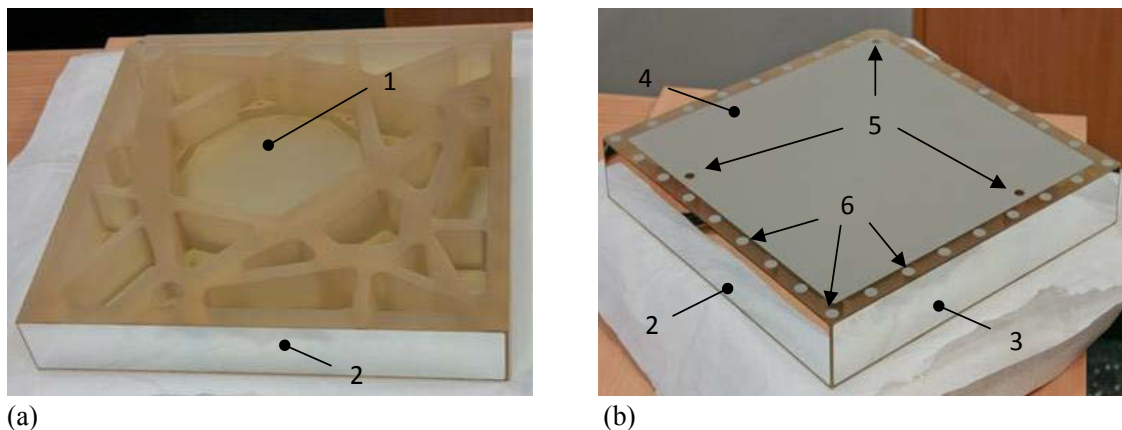


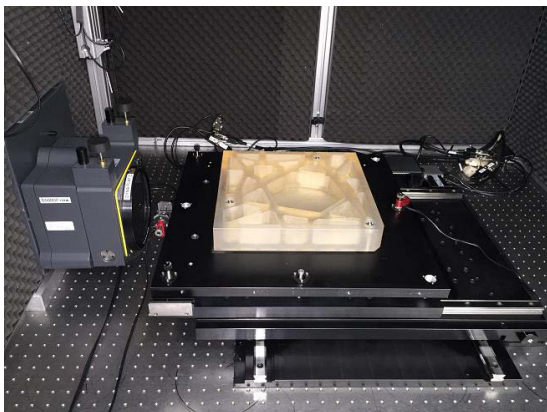
Abbildung 5.1: Raumspiegelecke der NPM-200: (a) Oberseite (1 Öffnung für Messungen im Abbepunkt, 2 x-Spiegelfläche) und (b) verspiegelte Unterseite (2 x-Spiegelfläche, 3 y-Spiegelfläche, 4 z-Spiegelfläche, 5 Befestigungsbohrungen, 6 Punkte als „Stitching-Marken“)

Die drei Messspiegelflächen der Raumspiegelecke wurden aus Kostengründen mit Ebenheitsabweichungen von  $\leq \lambda/2$  und Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Messspiegelflächen von  $< 1'$  hergestellt. Diese vorgegebenen Fertigungstoleranzen reichen jedoch nicht aus, um die angestrebte 3D-Messunsicherheit von 30 nm mit der NPM-200 zu erreichen [3]. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass die Geometrie und die Topographie der Messspiegelflächen der Raumspiegelecke mit Nanometerpräzision

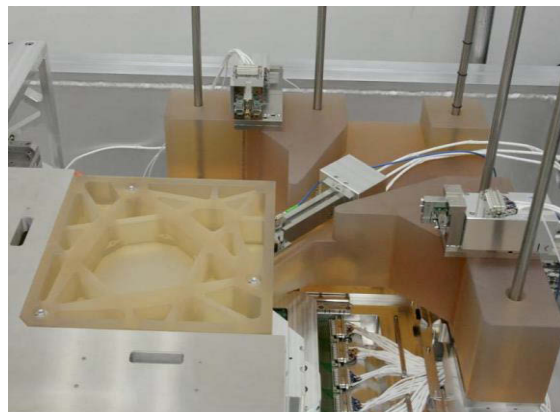


messtechnisch erfasst und anschließend zur Echtzeitkorrektur der systematischen Abweichungen verwendet werden.

Anschließend können mit Hilfe der als systematische Abweichungen hinterlegten Messdaten der Raumspiegelecke im Messbetrieb der NPMM-200 rechnerisch die Messdaten von Proben in Echtzeit korrigiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung von Topographiedaten der Raumspiegelecke der NPMM-200 mit einem erweiterten GPI-XP-Interferometer der Firma Zygo durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass der Durchmesser des Referenzspiegels (ca. 150 mm) nur ausschnittsweise Messungen der Topographie zulässt und der gesamte Messbereich der Messspiegelfläche auf diese Weise nicht komplett erfasst werden kann, muss die Vermessung der Oberfläche mit Hilfe des Zygo-Interferometers ausschließlich im Stitching-Verfahren durchgeführt werden (vgl. Abbildung 5.2a). Dieses Messverfahren und deren Unsicherheit wurden schon im vorangegangenen Kapitel 3 ausführlich beschrieben.



(a)



(b)

Abbildung 5.2: Raumspiegelecke der NPMM-200: (a) im Prüfbauzustand (Messaufbau für die Topographiemessung der x-Spiegelfläche) (b) im eingebauten Zustand in der NPMM-200

Im nächsten Abschnitt werden zunächst der Messprozess für die großflächigen Topographiemessungen der x- und y-Spiegelfläche, die Auswertung und die Analyse der erfassten Messwerte beschrieben.

## 5.1 Messprozess für Topographiemessung der x- und y-Spiegelfläche

Die Topographiemessungen der x- und y-Messspiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke wurden am Subapertur-Stitching-Interferometer ausgeführt. Bei den Messungen wurden durch eine in den Versuchsaufbau integrierte Justier- und



Verschiebeeinheit mehrere Ausschnitte der Topographie der x- und y-Messspiegelfläche schrittweise gemessen. Die einzelnen Aufnahmen des 6 Zoll GPI-XP-Interferometers wurden dann mit der Stitching-Software „SmartStitching“ zusammengefügt.

### 5.1.1 Darstellung des Messablaufs

Wie in Abbildung 5.3 dargestellt, besteht der gesamte Messaufbau zur Topographiemessung der x- und y-Messspiegelfläche aus einem 6 Zoll Zygo-GPI-Interferometer, einem hochpräzisen XY-Verschiebetisch der Firma Aerotech (Modell: AST36230) mit einer Auflösung von  $0,1\ \mu\text{m}$  und der Raumspiegeleckebaugruppe mit integrierter Justiereinrichtung. Der XY-Verschiebetisch ist motorisiert und ermöglicht damit eine automatisierte Messung bis  $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ . Der Doppelpfeil zeigt die Richtung, in der die Raumspiegelecke parallel zur Referenzplatte des Interferometers beweglich ist. Die Steuerung der Motoren übernimmt der Npaq<sup>®</sup>-Controller, der selbst über die USB-Schnittstelle per Computer angesteuert werden kann.

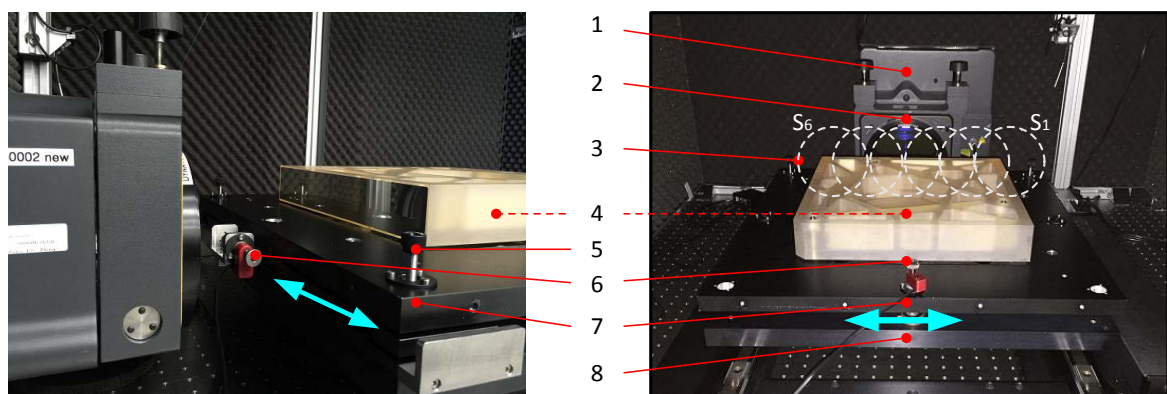


Abbildung 5.3: Messaufbaus zum Vermessen der x- / y-Spiegelfläche der Raumspiegel der NPM-200 mittels Zygo-Interferometers mit Erläuterung der wesentlichen Komponenten (1 Zygo-Interferometer, 2 Referenzspiegel des Interferometers, 3 Subaperturen ( $S_1$  bis  $S_6$ ), 4 Raumspiegelecke, 5 Mikroschraube, 6 Picomotor, 7 Trägerplatte der Raumspiegelecke mit Justierfunktion, 8 XY-Verschiebetisch der Firma Aerotech)

Um die Topographiemessung der x- und y-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke im montierten Zustand (analog zum eingebauten Zustand in der NPM-200) durchzuführen, wurde die Raumspiegelecke zunächst auf einer 15 mm dicken Trägerplatte aus Aluminium aufgesetzt und fest verschraubt. Die Lagerung der Raumspiegelecke erfolgt statisch bestimmt an drei Auflagepunkten. Nach der Montage der Raumspiegelecke auf der Trägerplatte wurde die gesamte Raumspiegeleckebaugruppe anschließend mittels zwei Mikrometerschrauben und eines Picomotors an drei Auflagepunkten auf dem Aerotech XY-Verschiebetisch angebracht. Bevor mit den Messungen begonnen werden konnte, musste die zu messende Teilfläche (Subapertur) der gesamten x- und y-Messspiegelfläche

parallel zur Referenzplatte des Interferometers genau ausgerichtet werden. Um dies zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine integrierte, mehrachsige mechanische Justiereinrichtung (Kippversteller) für die NPM-200-Raumspiegelecke entwickelt.

### Aufbau und Funktionsweise der Justiereinrichtung der Raumspiegelecke

Der Aufbau der Raumspiegeleckebaugruppe mit integrierter Justiereinrichtung ist in der Explosionszeichnung in Abbildung 5.4a dargestellt. Die Justiereinrichtung befindet sich zwischen der Trägerplatte der Raumspiegelecke und dem XY-Verschiebetisch. Über die beiden Mikrometerschrauben und den Picomotor in vertikaler Richtung werden dabei sowohl die Kippung der Raumspiegelecke um die horizontale Achse (x-Achse) als auch das Ausrichten der zu messenden Messspiegelfläche parallel zum Kamera-Koordinatensystem des Zygo-Interferometers realisiert (vgl. Abbildung 5.4).

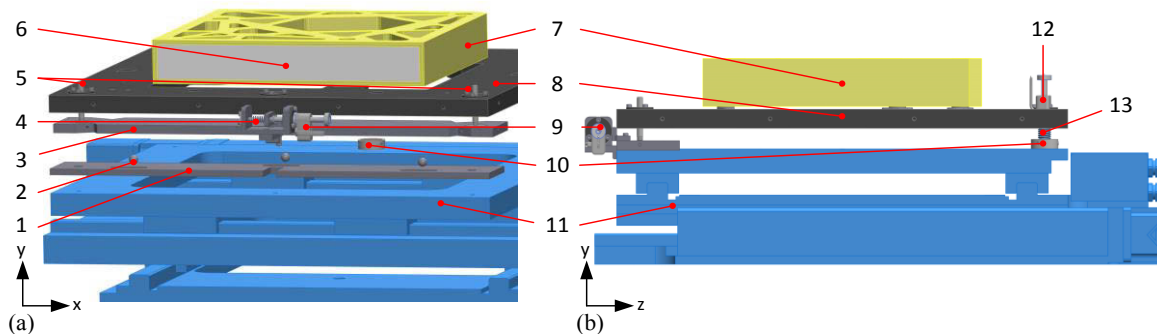


Abbildung 5.4: Aufbau und Anordnung der Justiereinrichtung für Winkelverstellung der NPM-200-Raumspiegelecke (a) Explosionszeichnung der Justage: Vorderseite der Justage zum Zygo-Interferometer, (b) Seitenansicht der Justage (1 Grundadapter (Flachkäfig), 2 Stahlkugel, 3 Läufer mit einer ebenen Fläche (geeignet für die Kugel-Ebene-Paarung) und einer V-Nut (geeignet für die Kugel-V-Nut-Paarung), 4 Aufnahmeadapter, 5 Mikrometerschrauben, 6 zu messende Messspiegelfläche, 7 NPM-200-Raumspiegelecke, 8 Trägerplatte der Raumspiegelecke, 9 Picomotor in horizontaler Richtung, 10 Adapter der Oberplatte des XY-Verschiebetischs mit einem Kegel (geeignet für die Kugel-Kegel-Paarung), 11 XY-Verschiebetisch, 12 Picomotor in vertikaler Richtung, 13 Druckfeder)

Die Drehung um die vertikale Achse (y-Achse) wird über einen zweiten Picomotor in horizontaler Richtung, welcher direkt auf einem Aufnahmeadapter befestigt ist, gewährleistet. Dieser bewegt eine Platte, nachfolgend als Läufer bezeichnet, die sich mittels drei Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 10 mm relativ zur Oberplatte des XY-Verschiebetischs (als Gestell) positionieren kann. Die Stahlkugeln rollen hierbei sowohl auf der Unterseite der Läufer (obere Ebene der Justiereinrichtung), als auch auf der Oberplatte des XY-Verschiebetischs (untere Ebene der Justiereinrichtung). Aus Sicherheitsgründen werden die Stahlkugeln je mittels eines spielbehafteten Flachkäfigs geführt. Für die benötigte Rückstellkraft sorgt eine eingebaute Druckfeder an der Rückseite

der Angriffsstelle des Läufers, an dem der Picomotor angreift. Bei dieser kinematischen Justiereinrichtung (vgl. Abbildung 5.4) wird der Kontakt zwischen der Trägerplatte der Raumspiegelecke und der Oberplatte des XY-Verschiebetischs bzw. dem Läufer über drei Kugelflächen (Kugelspitze von dem Picomotor und der zwei Mikrometerschrauben) realisiert, die auf der Gegenseite in einer V-Nut, einem Kegel und auf einer ebenen Fläche aufliegen. Die Raumspiegelecke mit der Trägerplatte wird zunächst in den Kegel eingesetzt. Dadurch werden die drei Freiheitsgrade der Translation in allen drei Raumrichtungen (Achsen x, y und z) ohne Redundanz eliminiert. In diesem Fall befindet sich der „Kegel“ an der Stelle des Picomotors in vertikaler Richtung. Die translatorischen Bewegungen während der Drehung um die vertikale Achse können somit ausgeschlossen werden und die Drehung um die gewünschte Achse wird dadurch überhaupt erst ermöglicht. Die wesentlichen Vorteile dieser Verbindungsvariante sind ihre gute Stabilität, eine verspannungsfreie Halterung der Raumspiegelecke und eine wiederholgenaue Positionierung, was insbesondere für die Untersuchung der Wiederholbarkeit sehr wichtig ist.

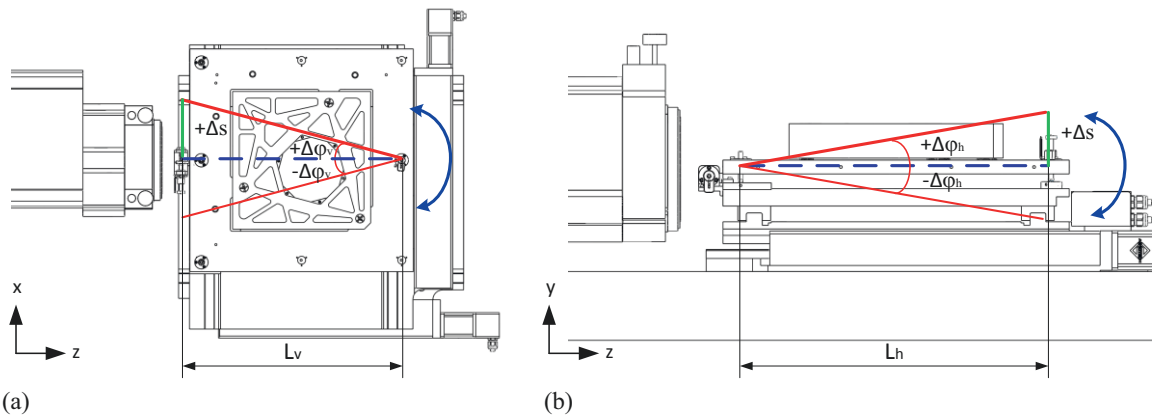


Abbildung 5.5: Empfindlichkeit bzw. Auflösung der Kippverstellung der neu entwickelnden Justage mittels Picomotor: (a) Kippen um die vertikale Achse ( $\Delta\phi_v$ ): Draufsicht, (b) Kippen um die horizontale Achse ( $\Delta\phi_h$ ): Seitenansicht

Die minimal einstellbare Winkelverstellung  $\Delta\phi_{min}$  (zulässige Verkipfung) lässt sich mit Hilfe der kleinsten Schrittweite des Picomotors  $\Delta S$  und der Länge des Hebelarms  $L$  berechnen. Die nachfolgende Berechnung bezieht sich auf die Abbildung 5.5:

$$\Delta\phi_{min} = \arctan\left(\frac{\Delta S}{L}\right) \quad (5.1)$$

Bei diesem Aufbau beträgt die Länge des Hebelarms für die Drehung um die vertikale Achse  $L_v = 495$  mm und horizontale Achse  $L_h = 450$  mm. Die kleinste Schrittweite des Picomotors  $\Delta S$  beträgt 30 nm. Daraus ergibt sich eine Auflösung der Kippverstellung von

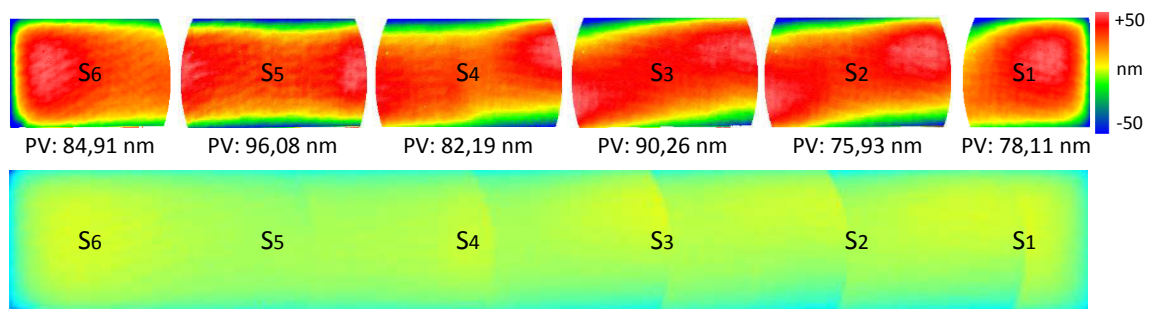
ca. 0,012" um die horizontale Achse und ca. 0,014" um die vertikale Achse (vgl. Abbildung 5.5). Durch die neu entwickelte, stufenlose und feinfühlig Justiereinrichtung der Raumspiegeleckebaugruppe kann die zu vermessende Messspiegelfläche schnell und exakt parallel zum Referenzspiegel des Zygo-Interferometers ausgerichtet werden.

Nach der Justierung wurden die Topographiemessungen der x- und y-Messspiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke am Subapertur-Stitching-Interferometer ausgeführt (vgl. Abbildung 5.3). Der Messraum ist mittels einer Klimaanlage auf  $\pm 0,2$  °C temperiert. Die Messungen wurden auf einem Labortisch, umgeben von einer Messhaube durchgeführt, wodurch die Temperaturschwankung während der Messungen auf weniger als  $\pm 0,1$  °C reduziert wurde. Auf Grund des komplexen Aufbaus der Raumspiegeleckehalterung (die Raumspiegeleckebaugruppe mit integrierter Justiereinrichtung und der XY-Verschiebetisch) befindet sich die horizontale Achse der zu messenden Oberflächen oberhalb der horizontalen Achse der Referenzplatte des Interferometers (ca. 10 mm). Wegen der Registrierung der Einzelmessflächen zueinander, wird ein Überlappungsbereich von 50 % benötigt. Da die Referenzplatte des Interferometers einen Durchmesser von 150 mm aufweist, waren jeweils sechs versetzte Einzelmessungen (sechs benachbarte Subaperturen) nötig, um die gesamte Spiegeloberfläche von 300 mm x 45 mm zu messen (vgl. Abbildung 5.3 rechts). Diese Prozedur wurde jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt, um zufällige Fehler zu minimieren. Die Messzeit für einzelne Segmente/Messung betrug etwa 10 Minuten. Um Schwingungen zu minimieren, ist es vorteilhaft, die Halteeinrichtung der Raumspiegelecke bei der Verschiebung mit sehr geringer Geschwindigkeit zu verfahren (Verfahrgeschwindigkeit: 1 mm/s). Der gesamte Verfahrweg belief sich auf ungefähr 250 mm. Die Positionierungsunsicherheit des XY-Verschiebetisches betrug ca.  $\pm 10$   $\mu$ m, was um Faktor 36 besser als die laterale räumliche Auflösung des Zygo-Interferometers von ca. 360  $\mu$ m pro Pixel (Auflösung bei der Bilderfassung: 640 x 480 Pixeln) ist. Dadurch konnte die örtliche Position der einzelnen Subaperturen als genau bekannt angesehen werden, was das Zusammenfügen der einzelnen Subtopographien mittels Stitching-Software vereinfachte. Die gesamte Dauer der Messung der x- bzw. y-Messspiegelfläche mit dem Stitching-Verfahren betrug ungefähr anderthalb Stunden. Anschließend wurden die sechs einzelnen Subtopographien, resultierend aus zehn wiederholten Messungen, mit der Stitching-Software „SmartStitching“ zusammengefügt.

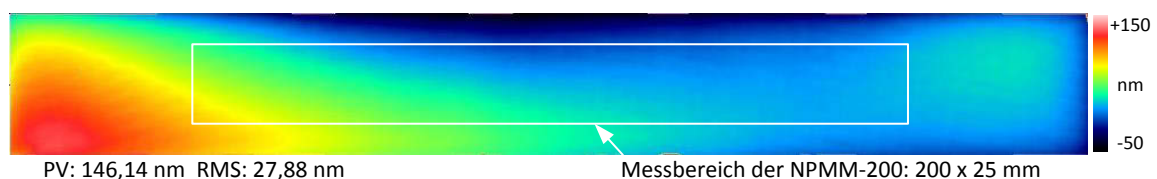
### 5.1.2 Auswertung und Analyse der Messdaten

In Abbildung 5.6 sind sowohl die Einzelergebnisse der sechs Subtopographien als auch die um die systematischen Abweichungen korrigierten Stitching-Ergebnisse und die durch die Stitching-Software „SmartStitching“ rekonstruierte Topographie der gesamten x-

Spiegeloberfläche von 300 mm x 45 mm in 2D als Falschfarbenbilder dargestellt (Platte C als Referenzplatte).



(a) vor Stitching-Prozess (Einzelergebnisse der sechs Subaperturen S1 bis S6)



(b) Ergebnis nach Stitching-Prozess (mit Korrektur der Formabweichung von der verwendeten Referenzfläche)

Abbildung 5.6: Stitching-Ergebnisse der x-Spiegelfläche der NPM-200-Raumspiegelecke mit Korrektur der Formabweichung der Referenzfläche, aber ohne Nivellierung

Die Formabweichung der um die systematischen Fehler korrigierten x-Spiegelfläche beträgt über den gesamten Messbereich 27,88 nm RMS und 146,14 nm PV.

### Nivellierung der erfassten Topographiedaten

Für die x- und y-Spiegelfläche der NPM-200-Raumspiegelecke wurde diese Untersuchung mittels Stitching-Verfahren jeweils zehnmal über 10 Tage (Ausführung einmal pro Tag) wiederholt, um die Vergleichbarkeit bei gleichen Bedingungen entsprechend Abbildung 5.3 zu untersuchen. Prinzipiell sollte die Messspiegelfläche an der Position der ersten Subapertur des Messprozesses (Subapertur  $S_1$ , vgl. Abbildung 5.6) bei den Wiederholungsmessungen identisch planparallel zum Referenzspiegel ausgerichtet sein, was aber in der Praxis nicht ideal umzusetzen ist. Die Parallelität zwischen dem Referenzspiegel und der Messspiegelfläche kann nur bis auf eine Restverkipfung von ca. 0,1° eingestellt werden. In diesem Fall ist die Anzahl der Interferenzstreifen im Interferogramm nämlich kleiner als eins. In den jeweiligen Messdaten ist daher in der Regel noch eine Restverkipfung vorhanden, die noch vor der Bestimmung der Vergleichbarkeit korrigiert werden muss. Die Nivellierung der Restverkipfung kann softwaretechnisch erfolgen. Die mittleren Ebenen werden dazu aus den Topographiedaten z. B. mit Hilfe linearer Regression (MATLAB®, SPIP® oder MountainsMap®) ermittelt und dann von diesen subtrahiert. In der Abbildung 5.7 sind beide Messwerte der kompletten x-Spiegelfläche vor bzw. nach dem Nivellieren sowohl als topografische Falschfarben-Grafik als auch in der 3D-Ansicht zum direkten Vergleich dargestellt. Der

Ursprung des Koordinatensystems ist mit dem Koordinatenursprung der NPM-200 Maschine identisch (vgl. Anhang C). Alle Koordinatenrichtungen folgen denen des NPM-200-Maschinenkoordinatensystems.

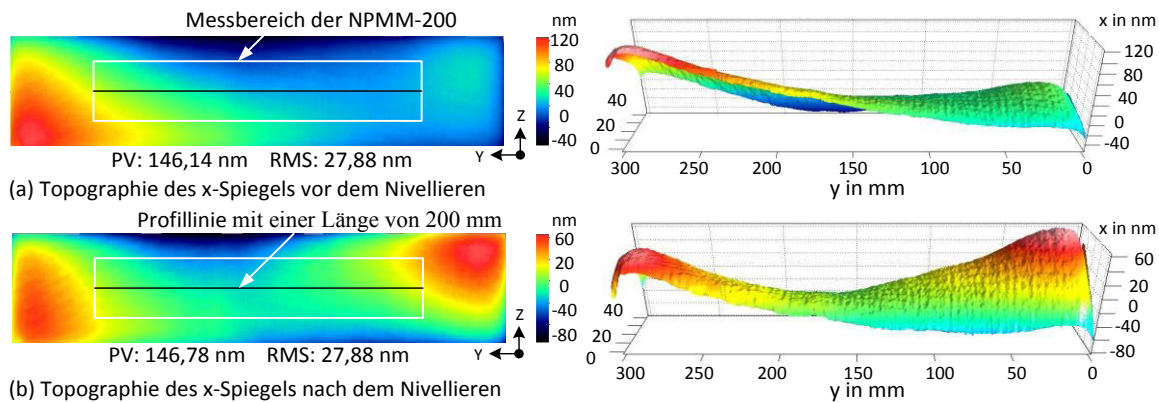


Abbildung 5.7: Vergleich der Topographie des x-Spiegels vor bzw. nach dem Nivellieren (mit und ohne linearen Untergrund)

Um die Einflüsse der unterschiedlichen linearen Untergründe (Restverkipfung) von den einzelnen Topographiedaten zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 5.8 die Messergebnisse der zehn wiederholten Messungen der x-Messspiegelfläche in horizontaler Richtung ohne bzw. mit Korrektur (Nivellierung der Messdaten) über den Messbereich von 200 mm. Dabei wurde durch wiederholtes Auflegen und Abnehmen der Raumspiegeleckebaugruppe auf die Dreipunktauflage, jeweils dieselbe Profilinie in horizontaler Richtung untersucht und graphisch dargestellt. In Abbildung 5.8a ist zu erkennen, dass die Werte der Standardabweichung tendenziell linear von der Mitte zum linken Rand deutlich zunehmen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Restverkipfung noch nicht aus den Messdaten herausgerechnet wurde. Abbildung 5.8b zeigt die signifikanten Verbesserungen der Vergleichbarkeit von Messungen nach der Nivellierung der Messdaten. Die Abweichung einzelner Werte der zeitlichen Verläufe am linken Rand nach der Korrektur ist deutlich kleiner geworden. Entsprechend hat sich die Standardabweichung aller über 10 Tage gemittelten Messpunkte der Profilinien von 2,47 nm auf 0,72 nm RMS bzw. von 9,17 nm auf 3,19 nm PV, um etwa den Faktor drei verbessert. Die verbleibende Abweichung zwischen den Vergleichsmessungen ist auf zufällige Restabweichungen zurückzuführen. Er setzt sich im Wesentlichen aus zwei Anteilen zusammen: zum einen kann sich der Halter der Raumspiegelecke aufgrund thermischer Drift der drei Auflagepunkte selbst leicht verkippen und zum anderen könnte die Raumspiegelecke im Halter während der Messung, verursacht durch Vibrationen, aus dem Verschiebetisch um einige Mikrometer aus der ursprünglichen Lage verrutscht sein.



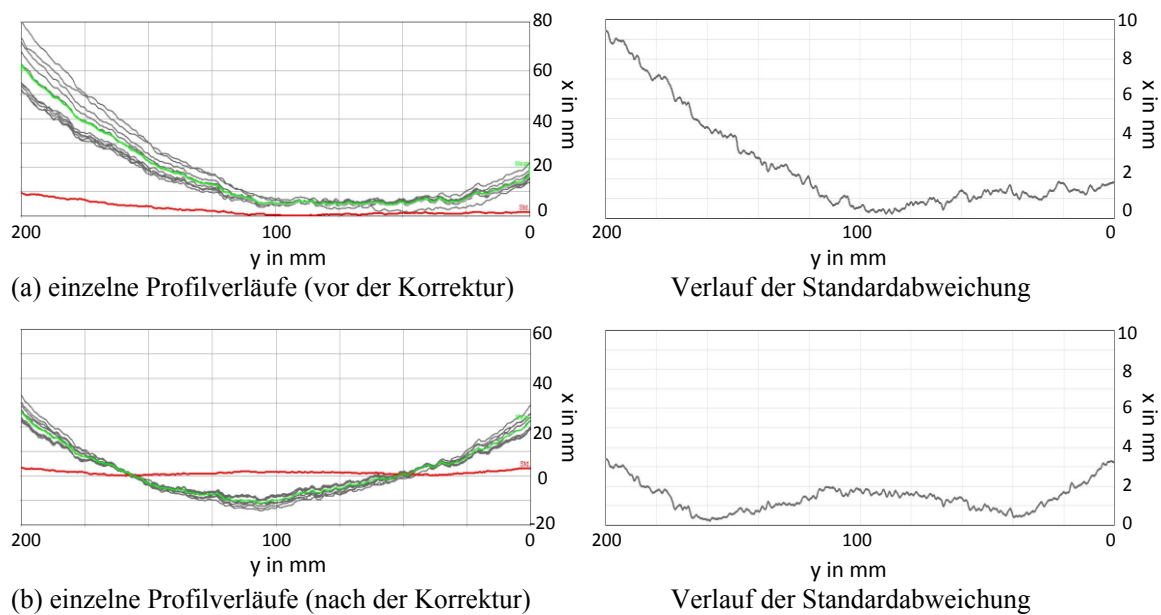


Abbildung 5.8: Vergleich der Messergebnisse mit den Profilschnitten der x-Messspiegelfläche aus 10 Wiederholungsmessungen über 10 Tage in horizontaler Richtung mit und ohne linearem Untergrund: (a) einzelne Profilverläufe vor der Korrektur und (b) einzelne Profilverläufe nach der Korrektur unter Anwendung linearer Regression (graue Kurven – einzelne Profillinien von zehn Einzelmessungen, grüne Kurve - Mittelwert aus allen zehn Profillinien, rote Kurve – Verlauf der Standardabweichung aller über 10 Tage gemittelten Messpunkte der Profillinien)

### Messergebnisse der Messspiegelfläche des x- und y-Spiegels der Raumspiegelecke

Um Randeffekte mit zu berücksichtigen, wurde die zu untersuchende Messfläche seitlich um 12,5 mm und die Höhe 2,5 mm an jedem Rand der Arbeitsfläche des x- und y-Spiegels (Messbereich der NPM-200) vergrößert bzgl. der Abmessungen der zu verwendenden Messspiegelfläche der Raumspiegelecke. Dadurch beträgt die Größe der zu untersuchenden Messspiegelfläche 225 mm x 30 mm für x- und y-Spiegel. Die aus 10 wiederholten Messungen gemittelten Topographien der Messspiegelfläche des x- und des y-Spiegels mit Korrektur systematischer Abweichungen bzw. nach Nivellierung sind in den Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 sowohl in der Falschfarben-Darstellung als auch in der 3D-Darstellung dargestellt.

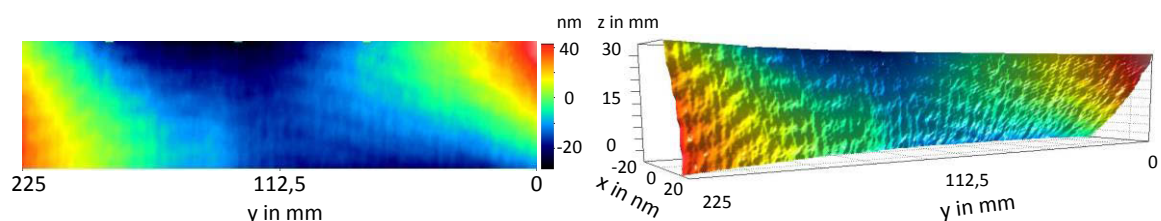


Abbildung 5.9: Darstellung von Messergebnissen der verwendeten x-Messspiegelfläche der NPM-200-Raumspiegelecke mit einer Größe von 225 mm x 30 mm (Platte C als Referenzplatte)

Die Formabweichung der gemittelten Topographie beträgt dabei über den gesamten Messbereich für den x-Spiegel 86,24 nm (ca.  $\lambda/7$ ) PV bzw. 16,08 nm (ca.  $\lambda/40$ ) RMS und für den y-Spiegel 75,51 nm PV bzw. 12,45 nm RMS. Unter Einhaltung der entsprechenden Messbedingungen sind die Messergebnisse aus den Wiederholmessungen mit einer Standardabweichung von  $< 3,6$  nm PV ( $< \lambda/175$ ) reproduzierbar.

Die gemittelte Topographie der Messspiegelfläche des y-Spiegels mit Korrektur systematischer Abweichungen ist in Abbildung 5.10 dargestellt und weist eine ähnliche Formabweichung auf wie die x-Messspiegelfläche. Für diesen Fall beträgt der experimentell ermittelte PV-Wert 75,51 nm und der RMS-Wert 12,45 nm.

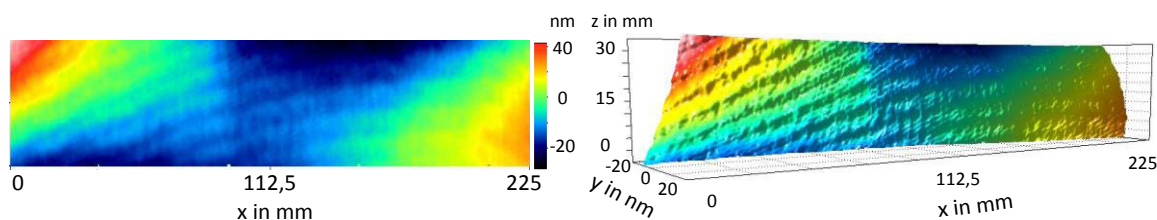


Abbildung 5.10: Darstellung von Messergebnissen der verwendenden y-Messspiegelfläche der NPM-200-Raumspiegelecke mit einer Größe von 225 mm x 30 mm (Platte C als Referenzplatte)

Wie in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 zu erkennen ist, weisen die Messspiegelflächen des x- und y-Spiegels regelmäßige Bearbeitungsspuren aus mehreren Kreisbögen auf. Es liegt nahe, dass diese Rillen/Welligkeit (Oberflächentexturen) durch Planschleifen oder Polierreifschleifen (z. B. Standard-Diamantkorn-CNC-Schleifen) an der Oberfläche der Raumspiegelecke aus Zerodur<sup>®</sup> entstanden sind [22, 56]. Der hierbei entstandene quadratische Mittenrauwert liegt bei  $R_q = 1,58$  nm (quadratischer Mittelwert des Rauhtiefenprofils nach DIN 4768). Die Nachwirkung der Bearbeitungsspuren kann somit vernachlässigt werden.

Im nächsten Kapitel werden zuerst die Topographiemessung der z-Messspiegelfläche der NPM-200-Raumspiegelecke mittels Stitching-Verfahren detailliert beschrieben und anschließend die Messergebnisse ausgewertet und analysiert.

## 5.2 Messprozess für großflächige Topographiemessung der z-Spiegelfläche

Die Raumspiegelecke der NPM-200 verformt sich wegen ihrer Größe und ihrem hohen Gewicht (ca. 7,6 kg) unter dem Einfluss der Gravitation. Die genaue Verformung, insbesondere der z-Messspiegelfläche, hängt von der Lage im Raum und den Lagerbedingungen ab. Um einen Eindruck über die Abhängigkeit der Topographie des z-



Spiegels von der Gravitation zu gewinnen, wurde eine FEM-Simulation durchgeführt. Die ermittelten „Rohergebnisse“ (Topographiedaten des z-Spiegels) der FEM-Simulation wurden nicht nivelliert. In Abbildung 5.11 ist das Ergebnis der FEM-Simulation dargestellt.

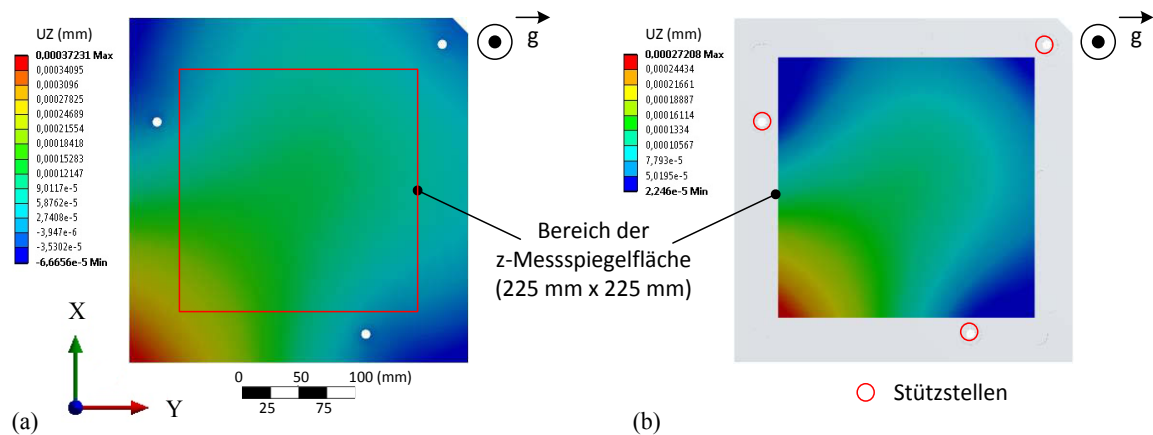


Abbildung 5.11: Ergebnis der FEM-Berechnung zur Plattendeformation des z-Spiegels – Verschiebung in z-Richtung unter Eigengewicht ohne Nivellierung (mit linearem Untergrund): (a) gesamte Topographie, (b) Topographie im Messbereich (225 mm x 225 mm)

Mittels FEM-Analyse lässt sich unter den gegebenen Randbedingungen eine maximale Durchbiegung im Messbereich in vertikaler Messrichtung (z-Achse) von ca. 450 nm für die komplette verspiegelte Fläche der z-Platte bzw. 250 nm ( $< \lambda/2$  PV) für die z-Messspiegelfläche ermitteln. Zudem sind die Verformungen symmetrisch zur Diagonalen zwischen x- und y- Achse verteilt, wie in der Abbildung 5.11 zu sehen ist. Das ist insbesondere auf die Lage der drei Stützstellen zurückzuführen. In der Darstellung ist dies deutlich zu erkennen. In der Praxis kann die Anpresskraft bei einer manuellen Fixierung der Raumspiegelecke über drei Befestigungsmuttern nicht genau dosiert werden, so dass es in ungünstigen Fällen zu zusätzlichen Deformationen der z-Messspiegelfläche kommen kann. Dies wurde allerdings nicht mittels FEM-Analyse simuliert. Es ist daher sinnvoll, die Ergebnisse aus den FEM-Berechnungen und aus späteren Experimenten direkt miteinander zu vergleichen, um den Einfluss des Anpressdrucks der manuellen Fixierung auf die z-Messspiegelfläche herausrechnen zu können.

### 5.2.1 Darstellung des Messablaufs

Auch die Erfassung der Topographie der verspiegelten z-Fläche mit einer Größe von 300 mm x 300 mm wurde mittels des Subapertur-Stitching-Verfahrens ermittelt und zwar analog der Einbaulage in der NPM-Maschine.

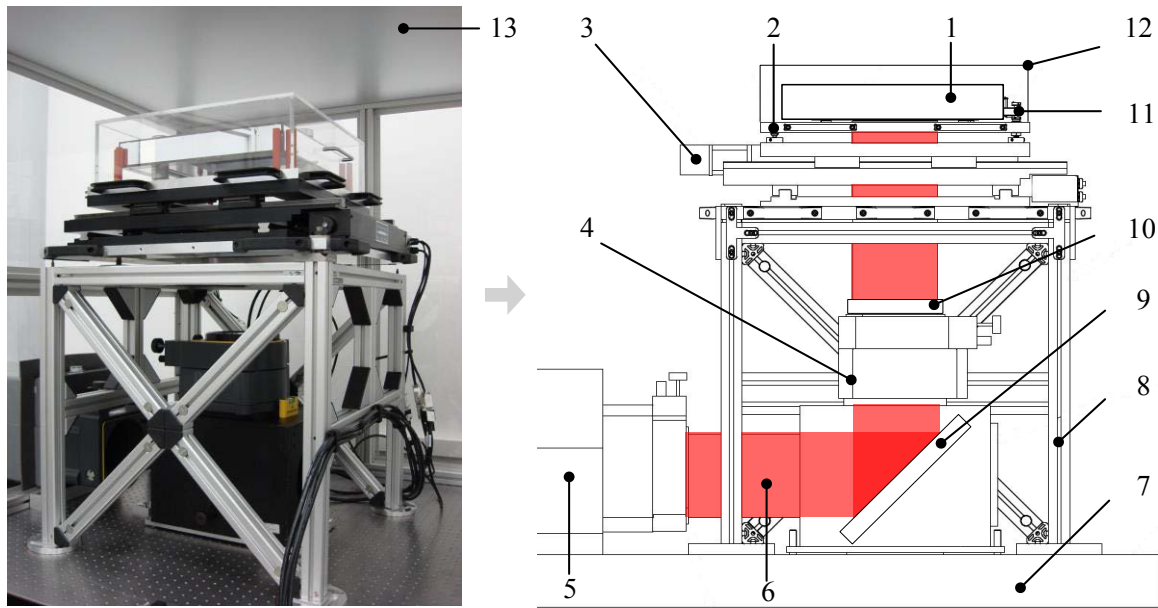


Abbildung 5.12: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Topographie des z-Spiegels der NPM-200-Raumspieglecke (1 Raumspiegelecke, 2 Trägerplatte der Raumspiegelecke mit Justierfunktion, 3 XY-Tisch, 4 elektronischer Phasenschieber, 5 Phasenschieber-Interferometer, 6 Laserstrahl, 7 schwingungsisolierter optischer Tisch, 8 Untergestell, 9 90°-Umlenkspiegel, 10 Referenzspiegel, 11 Picomotor, 12 Schutzhaube der Raumspiegelecke aus Acrylglas, 13 Messhaube)

Wie in Abbildung 5.12 dargestellt, besteht der gesamte Messaufbau zur Topographiemessung der z-Messspiegelfläche aus einem 6 Zoll Zygo-GPI-Interferometer, einem 90°-Umlenkspiegel, einem Untergestell, einem XY-Verschiebetisch der Firma Aerotech (Modell: AST36230) und der Raumspiegeleckenbaugruppe mit integrierter Justiereinrichtung. Dieser zweiachsige Verschiebetisch mit großer Apertur (360 mm x 360 mm) und offenem Rahmen erfüllt die Anforderung des Messbereichs des Subapertur-Stitching-Interferometers für die topographische Untersuchung des z-Spiegels der NPM-200-Raumspiegelecke. Die prinzipielle Funktionsweise des Messsystems zur Topographiemessung der z-Spiegelfläche wurde in Kapitel 3.1 bereits beschrieben.

Ein Stitchregime wurde unter Berücksichtigung der Maße des z-Spiegels, des Aperturdurchmessers des Interferometers sowie der Positioniermöglichkeit des Tisches festgelegt (vgl. Abbildung 5.13a). Da die Referenzfläche des Subapertur-Stitching-Interferometers einen Durchmesser von 150 mm aufwies, waren jeweils sechzehn versetzte Einzelmessungen ( $S_1$  bis  $S_{16}$ , Verkettung von 4x4 Einzelmessungen) nötig, um die gesamte Spiegeloberfläche des z-Spiegels von 300 mm x 300 mm mit 40 % Überlappungsbereich für das Stitchen zu messen. Der Positionierpfad der Subaperturen verläuft mäanderförmig, was die geringste Messzeit beansprucht (vgl. Abbildung 5.13a). Je geringer die Messzeit ausfällt, desto geringer ist ein Einfluss Umweltbedingungen auf das Messergebnis zu erwarten. Alle sechzehn Einzelmessungen wurden jeweils zehnmal wiederholt und

gemittelt. Die Messzeit für einzelne Segmente betrug etwa 15 Minuten. Die Verfahrensgeschwindigkeit des XY-Verschiebetisches betrug 1 mm/s. Die gesamte Dauer der Messung des z-Spiegels betrug ungefähr vier Stunden.

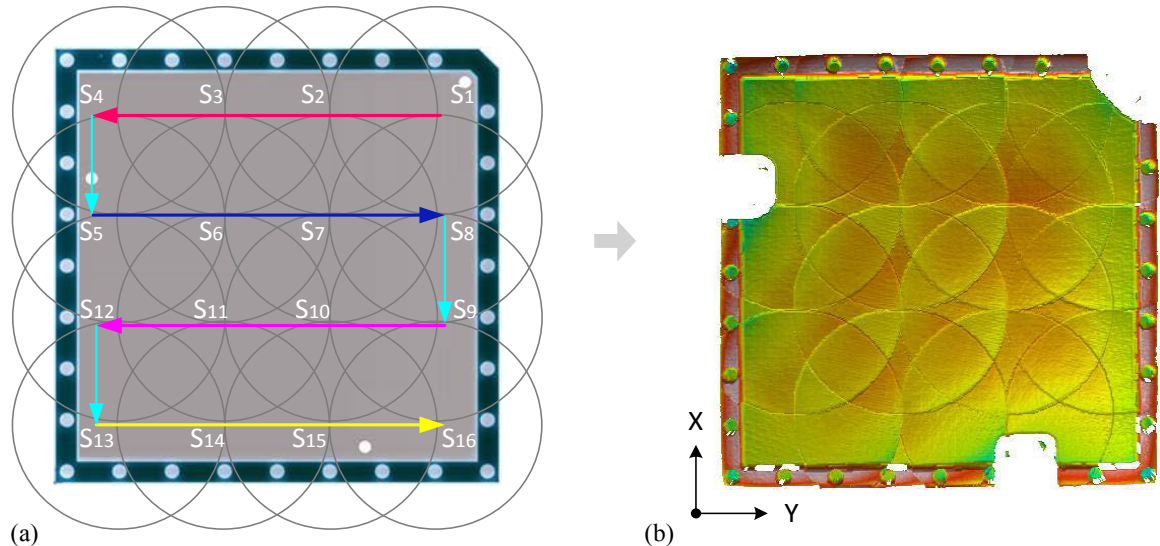


Abbildung 5.13: Abläufe des Subapertur-Stitching-Verfahrens zur Topographiemessung des z-Spiegels der NPM-200-Raumspiegelecke (16 Einzelmessdaten, Subaperturen  $S_1$  bis  $S_{16}$  werden im Stitching-Verfahren zusammengesetzt): (a) Stitching-Regime (16 benötigte Einzelmessungen und ihre Positionen), (b) Darstellung der Einzelmessergebnisse des Subapertur-Stitching-Interferometers (vor dem Stitching-Prozess)

Die Messbedingungen entsprechen denen der Seitenspiegel. Aufgrund des langen Dauerbetriebs des motorisierten XY-Verschiebetisches und des Phasenschiebers des Zygo-Interferometers stieg die Temperatur während des Messzyklus um ca. 0,3 °C.

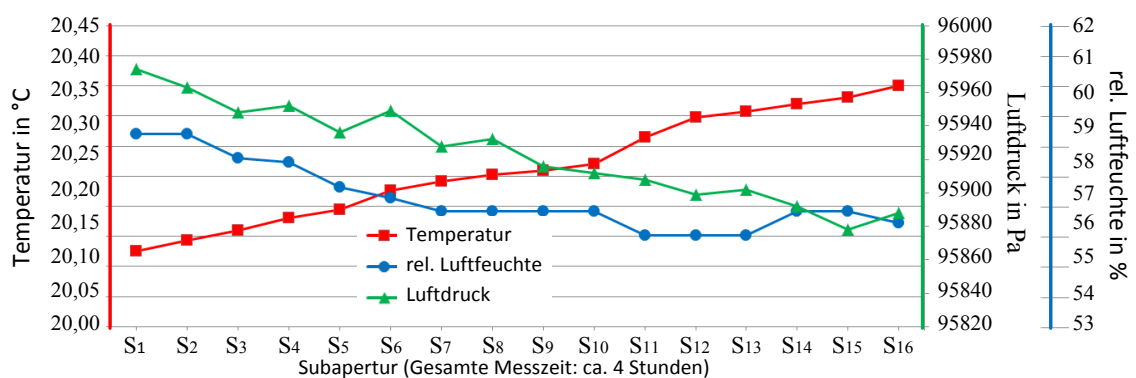


Abbildung 5.14: Zeitlicher Verlauf der Messwerte von Temperatur, Luftdruck und relativer Luftfeuchtigkeit

Die Einflüsse der gemessenen Umweltparameter Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchtigkeit (vgl. Abbildung 5.14) auf die Luftbrechzahl und demzufolge auf die interferometrische Längenmessung wurden mit Hilfe der empirischen Gleichung nach

Edlén [26, 44] in Echtzeit unter Verwendung der Messsoftware MetroPro<sup>®</sup> korrigiert, wie auch bei der Topographiemessung der x- und y-Messspiegelfläche.

### 5.2.2 Auswertung und Analyse der Messdaten

In Abbildung 5.13b werden Einzelergebnisse der sechzehn Subtopographien in 2D als Falschfarbenbilder vor dem Stitching-Prozess dargestellt. Alle erfassten Ausschnitte des z-Spiegels wurden anschließend mittels der Stitching-Software „SmartStitching“ zu einer Gesamtopographie zusammengesetzt und ausgewertet. Die zusammengefügte Gesamtopographie des z-Spiegels mit einer Größe von 300 mm x 300 mm aus sechzehn Subtopographien ist in Abbildung 5.15 sowohl in der Falschfarben-Darstellung als auch in der 3D-Darstellung gezeigt.

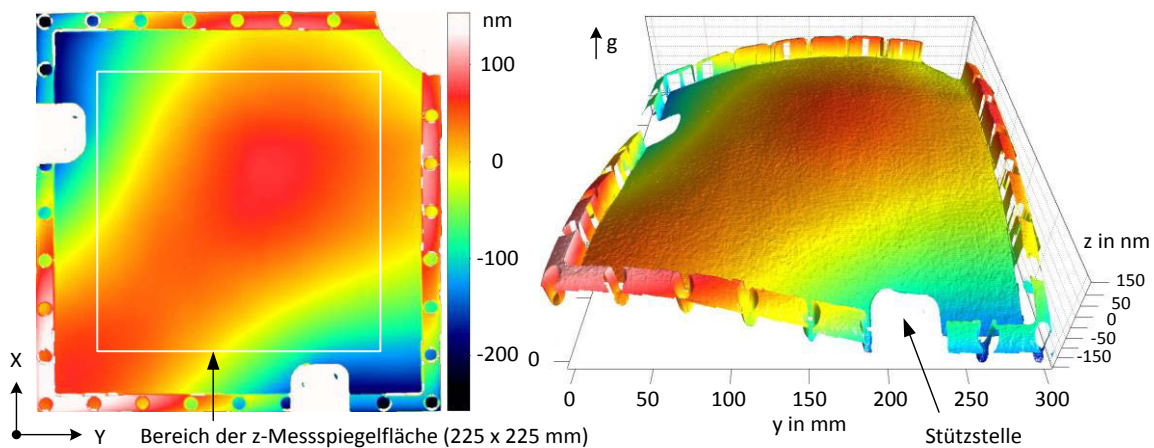


Abbildung 5.15: Stitching-Ergebnisse der Gesamtopographie des z-Spiegels der NPMM-200-Raumspiegelecke aus Perspektive des Interferometers (Größe von 300 mm x 300 mm) mit Korrektur der Formabweichung der Referenzfläche (Platte C als Referenzplatte) bzw. nach Nivellierung (ohne linearem Untergrund)

Die Formabweichung beträgt dabei über den gesamten Messbereich 63,34 nm (ca.  $\lambda/10$ ) RMS bzw. 412,81 nm (ca.  $\lambda/1,5$ ) PV. Es ist deutlich zu erkennen, dass es insbesondere in den äußeren Bereichen der Topographie, wo die mechanischen Spannungen über die drei Auflagepunkte (Stützstellen) eingeleitet werden, zu leichten Deformationen der Oberfläche kommt. Dies entspricht den erwarteten Ergebnissen der FEM-Berechnung. Der Messbereich der NPMM-200 in lateraler Richtung (x, y) beträgt 200 mm x 200 mm. Deshalb wird nur der innere Bereich des z-Spiegels als Messspiegelfläche für die NPMM-200 verwendet, weil hier Einfluss der mechanischen Spannungen weit geringer als im Randbereich ist. Um einen Randeffekt zu ermitteln, müssen die Länge und Höhe der zu untersuchenden Messfläche jeweils 12,5 mm an jedem Rand größer sein, als die Abmessung der zu verwendenden z-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke der NPMM-200. In diesem Fall beträgt die Größe der zu untersuchenden Messspiegelfläche

225 mm x 225 mm. Diese Messspiegelfläche wurde durch eine quadratische Maske mit Seitenlängen von 225 mm (weiß markiert, vgl. Abbildung 5.15a) als auswertbarer Bereich definiert. Der Mittelpunkt der Maske liegt im Zentrum der Gesamtopographie des z-Spiegels.

Die für NPMM-200 verwendete Topographie der z-Messspiegelfläche (Ausschnitt der Gesamtopographie des z-Spiegels) wurde aus zehn Wiederholungsmessungen ermittelt. Zwischen den einzelnen Topographien der Wiederholungsmessungen treten sogenannte „Matchingfehler“ auf. Diese entstehen zum einen durch Abweichungen bei der Positionierung und zum anderen durch Abweichungen, die durch die Quantisierung auf ganzzahlige Pixelpositionen verursacht werden. Die Topographien der Wiederholungsmessungen sind aufgrund der Matchingabweichungen in zufälliger Weise gegeneinander leicht verschoben, wie in Abbildung 5.16a dargestellt.

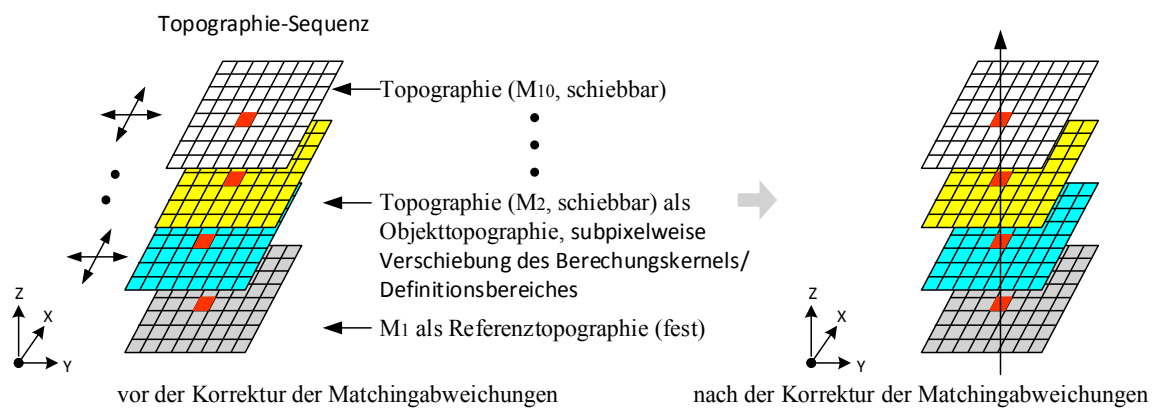


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung der Matchingabweichungen und deren Korrektur

Um Auswirkungen von Fehlberechnungen einzelner Topographien auf die gesamte Topographiereihe zu minimieren und möglichst zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, werden Matchingabweichungen durch das Kreuzkorrelationsverfahren unter Verwendung der Topographieinformation in Form der tiefencodierten Grauwerte ermittelt und mit Subpixel-Genauigkeit korrigiert. Das Kreuzkorrelationsverfahren liefert über den Kreuzkorrelationskoeffizienten  $\rho$  ein Maß für die Übereinstimmung zwischen der Referenztopographie und der Objekttopographie. Dadurch werden die linearen Zusammenhänge zwischen den Pixelwerten der Referenztopographie und den Werten der Objekttopographie quantifiziert und bewertet. In diesem Fall wurde die Topographie der ersten Messung ( $M_1$ ) als Referenztopographie definiert, die Topographien der übrigen Messungen wurden als Objekttopographie ( $M_2$  bis  $M_{10}$ ) bezeichnet. Der lineare Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho$  zwischen den sich

überlappenden Objektbereichen der transformierten Topographie und der Referenztopographie (Zieltopographie) wurde nach Gleichung (5.2) berechnet.

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{s=-S}^S \sum_{r=-R}^R [f(x' + s, y' + r) - \bar{f}][g(x + s, y + r) - \bar{g}]}{\{\sum [f(x' + s, y' + r) - \bar{f}]^2 \sum [g(x + s, y + r) - \bar{g}]^2\}^{0,5}} \quad (5.2)$$

Der Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho(x, y)$  dient hier als Ähnlichkeitsmaß zwischen der transformierten Topographie und der Referenztopographie mit Ausschnittdimensionen in  $x = 2S+1$  (Anzahl der Spalten der Topographie) und in  $y = 2R+1$  (Anzahl der Zeilen der Topographie).  $(x, y)$  und  $(x', y')$  sind Pixelkoordinaten des Zentrums der Objekttopographie und der Referenztopographie.  $f$  ist der Grauwert der Objekttopographie und  $g$  ist der Grauwert der Referenztopographie.  $\bar{f}$  und  $\bar{g}$  sind die entsprechenden Mittelwerte von  $f$  und  $g$ . Die korrespondierende Referenztopographie in der Objekttopographie wird an allen Stellen des definierten Suchfensters gesucht. Die berechnete Lösung als Positionsangabe ist diejenige, welche die Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen den Topographien maximiert. Dies entspricht der gesuchten Verschiebung zwischen der Referenztopographie und der Objekttopographie. Die Normierung der Kreuzkorrelationskoeffizienten liefert einen Wertebereich von -1 bis 1, wobei 0 keine Korrelation und 1 bzw. -1 eine vollständige Übereinstimmung von Referenztopographie und Objekttopographie bedeutet. In der Praxis liegen stark korrelierte Werte bei  $0,6 \leq \rho \leq 1$ , was einer sehr starken Ähnlichkeit entspricht [53]. Nach der Korrektur der Matchingabweichungen fallen einzelne Pixel der registrierten Topographien auf das Raster der Referenztopographie, wie in Abbildung 5.16b dargestellt. Nach einer eingehenden Untersuchung der Matchingabweichungen wurde festgestellt, dass die Objekttopographien ( $M_2$  bis  $M_{10}$ ) gegenüber der Referenztopographie ( $M_1$ ) aus zehn Wiederholungsmessungen um max. 0,1 Pixel (ca. 36  $\mu\text{m}$ ) in x- bzw. y-Richtung verschoben sind. In den meisten Fällen beträgt die Verschiebung jedoch fast null. Damit sind die Matchingabweichungen zwischen den einzelnen Topographien der Wiederholungsmessungen kaum signifikant.

Die aus 10 wiederholten Messungen gemittelten Topographien der Messspiegelfläche des z-Spiegels nach Nivellierung bzw. mit Korrektur systematischer Abweichungen und Matchingfehler sind in Abbildung 5.17 sowohl in der Falschfarben-Darstellung als auch in der 3D-Darstellung dargestellt.



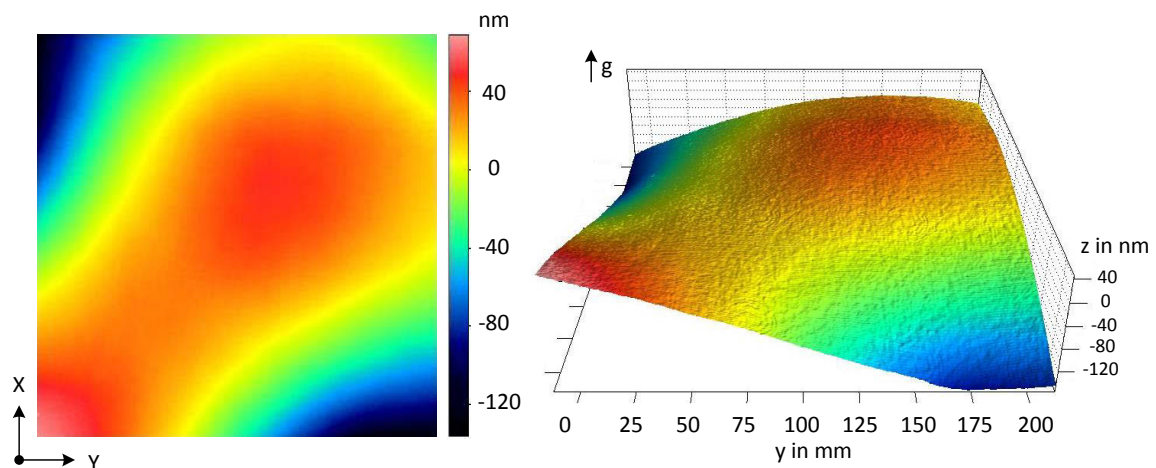


Abbildung 5.17: Stitching-Ergebnisse der Topographie der Messspiegelfläche des z-Spiegels der NPMM-200-Raumspiegelecke nach Ansicht des Interferometers (Größe von 225 mm x 225 mm) mit Korrektur der Formabweichung der Referenzfläche (Platte C als Referenzplatte) bzw. nach Nivellierung (ohne linearem Untergrund)

Die Formabweichung der gemittelten Topographie beträgt dabei 199,76 nm ( $< \lambda/3$ ) PV und kann mit einer erweiterten Unsicherheit  $U$  auf einem Vertrauensniveau von 95,4 % mit 3,32 nm ( $k = 2$ ) angegeben werden. In der Abbildung 5.17 ist zu sehen, dass es insbesondere in den äußeren Bereichen der z-Messspiegelfläche, wo die mechanischen Spannungen über die drei Spiegelplattenhalter eingeleitet wurden, zu leichten Deformationen kommt. Die maximale Verformung befindet sich an der vorderen Ecke der z-Messspiegelfläche. Dies entspricht dem erwarteten Ergebnis der FEM-Berechnung. In Abbildung 5.18 ist sowohl die vorausberechnete Topographie der Messspiegelfläche des z-Spiegels aus der FEM-Berechnung als auch die gemessene Topographie dargestellt. Die berechneten Werte wurden linear interpoliert und nivelliert, um die beiden Ergebnisse direkt miteinander vergleichen zu können. Aus der Abbildung 5.18 wird ersichtlich, dass die mit dem FEM-Modell berechneten Werte qualitativ gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Der PV-Wert der Differenz der Topographien betrug nur ca. 40 nm (Abweichungen von ca. 20 % (40 nm / 200 nm)). Es lagen somit keine signifikanten Unterschiede zwischen den tatsächlichen und den erwarteten Ergebnissen vor. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass die Verformungen der Messspiegelfläche des z-Spiegels ausschließlich aus dem wirkenden Eigengewicht entstehen.

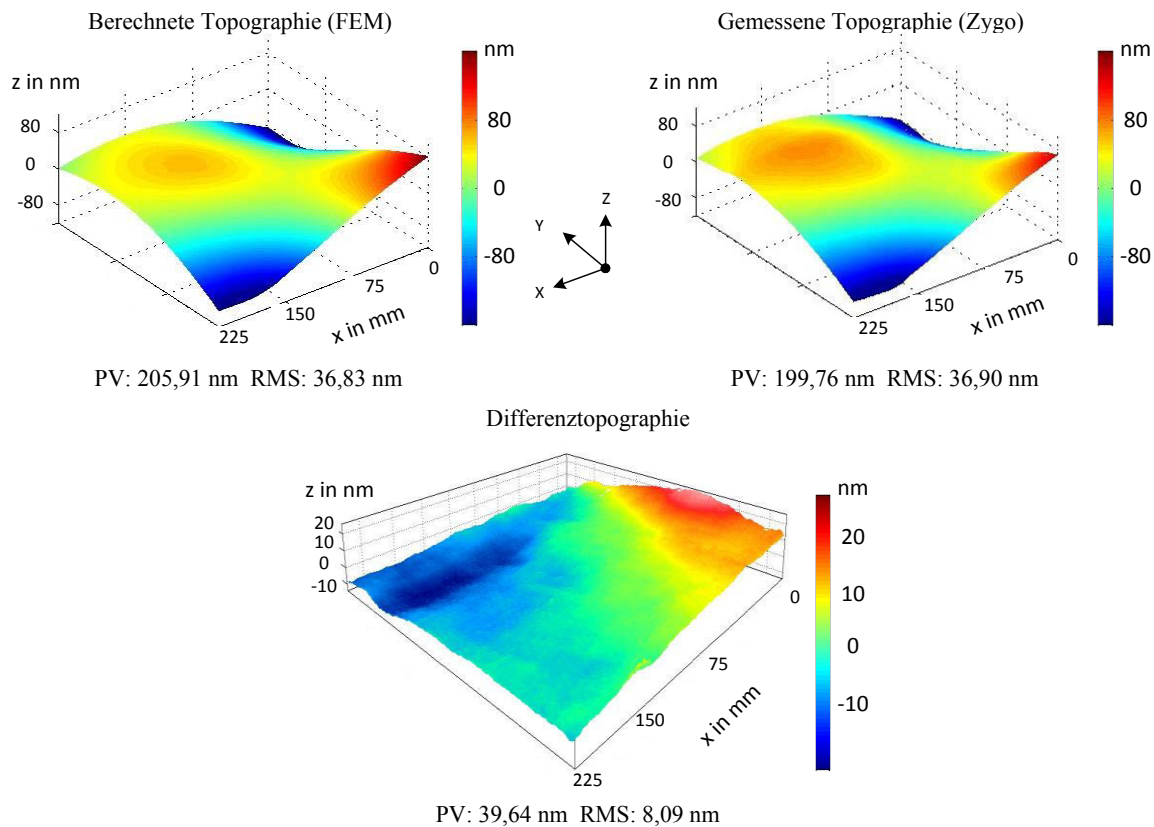


Abbildung 5.18: Berechnete Topographie der Messspiegelfläche des z-Spiegels aus der FEM-Berechnung (resultierende Verschiebung unter Eigengewicht und ohne Einfluss der Verkipfung) im Vergleich mit realen Messdaten aus der interferometrischen Messung mit Korrektur der Formabweichung der Referenzfläche (Platte C als Referenzplatte) bzw. nach Nivellierung (ohne linearem Untergrund)

Um die Reproduzierbarkeit bei der Messung der z-Messspiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke am Subapertur-Stitching-Interferometer abschätzen zu können, wurden aus den aufgenommenen topographischen Datensätzen 10 Profilschnitte herangezogen. In Abbildung 5.19 sind die Verläufe der Profilmessdaten entlang der horizontalen und vertikalen Mittelachsen der z-Messspiegelfläche zum direkten Vergleich dargestellt. Die Profildaten bestehen dabei aus 10 Messungen der z-Messspiegelfläche, die innerhalb eines Zeitraums von drei Monaten durchgeführt wurden. Während der Messungen wurden keine Änderungen im Messaufbau durchgeführt und die Spiegelecke lediglich für Vergleichsmessungen aufgelegt und wieder abgenommen, so dass alle Einzelmessungen unter gleichartigen Versuchsbedingungen (gleicher Messort, gleicher Prüfer, konstante Parameter, gleiche Prüfausstattung und identisches Messobjekt) stattfanden. Somit sind jegliche systematischen Einflüsse auf die Messungen für jeden Messwert nahezu gleich geblieben. Die Auswertung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der einzelnen Profildaten.



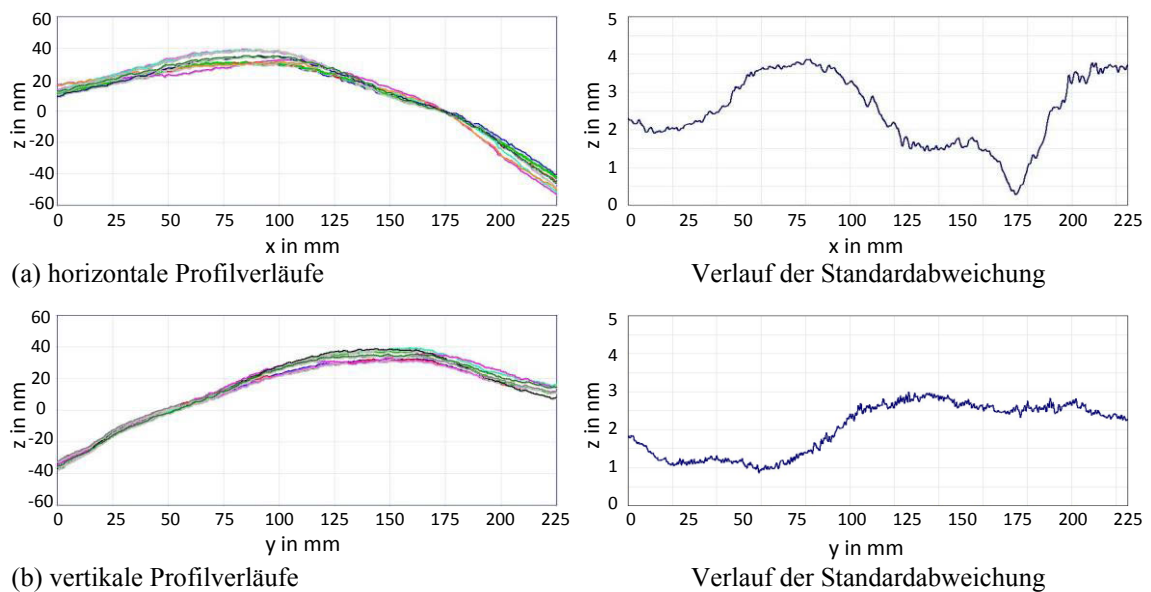


Abbildung 5.19: Vergleich der Messergebnisse mit den Profilschnitten der z-Messspiegelfläche aus 10 innerhalb eines Zeitraumes von über drei Monaten durchgeführten Wiederholungsmessungen in horizontaler und vertikaler Richtung

Schließlich ist die Standardabweichung über alle Einzelmessungen für jeden einzelnen Pixel (insgesamt 390625 Pixel (Größe von 625 x 625 Pixel) im Sichtfeld) der Topographiedaten der z-Messspiegelfläche in Abbildung 5.20 dargestellt. Die pixelweise Standardabweichung ist ein sehr präzises Maß für die Reproduzierbarkeit der Messungen und liefert mehr ortsabhängige Informationen im Vergleich zum PV- bzw. RMS-Wert. Die Standardabweichungen aller Pixel weisen einen Maximalwert von 6,87 nm auf.

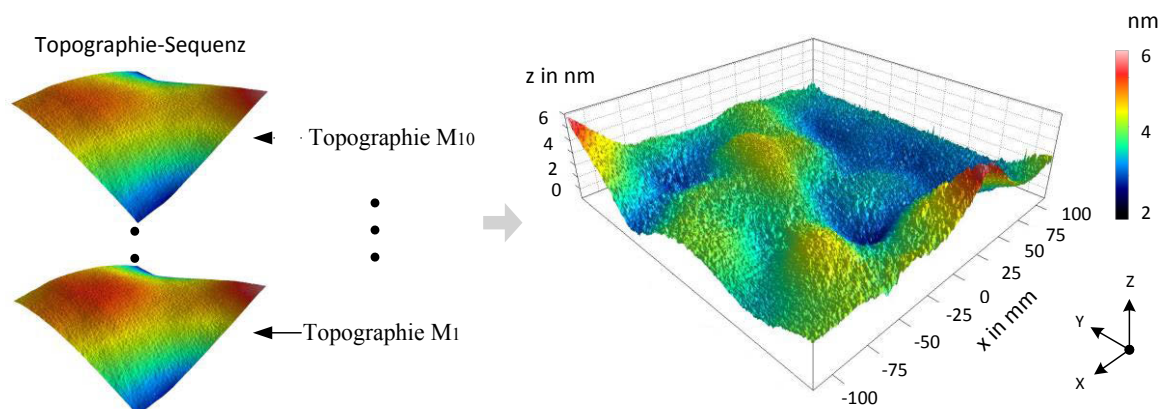


Abbildung 5.20: Standardabweichung pro Pixel über 10 Messungen der z-Messspiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke (Größe von 225 mm x 225 mm)

Wie in Abbildung 5.20 zu sehen ist, befinden sich die maximalen Standardabweichungen in den Randbereichen der z-Messspiegelfläche. Als Ursache dafür können die mechanischen Spannungen der Befestigung verantwortlich gemacht werden. Eine

minimale Änderung der Messbedingungen führte an den Randbereichen zu einer vergleichsweise stärkeren Schwankung der Messwerte bei wiederholter Messung.

Durch diese Untersuchung ist sichergestellt, dass die Messergebnisse unter Vergleichsbedingungen mit einer Standardabweichung von kleiner als ca. 7 nm reproduzierbar sind.

### 5.2.3 Untersuchung der Langzeitstabilität der z-Spiegelfläche über einen Zeitraum von drei Jahren

Die Raumspiegelecke aus Zerodur®-Glaskeramik zählt zu den besonders funktionswichtigen und kritischen Komponenten der NPMM-200, da sie die orthogonalen 3D-Referenzflächen der NPMM-200 definiert. Deshalb spielt die Langzeitstabilität der Raumspiegelecke bzw. ihre dimensionale Stabilität neben den mechanischen und thermischen Werkstoffeigenschaften eine wichtige Rolle. In jüngster Zeit wurden vereinzelt Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Zerodur®-Glaskeramik publiziert [19, 88]. Die relativen Längenänderungen der Zerodur®-Glaskeramik (dimensionelle Stabilität) bei Raumtemperatur sind von  $-0,69 \times 10^{-6}$  bis  $-0,03 \times 10^{-6}$  m pro Jahr über eine längere Messperiode (Betrachtungszeit) von bis zu 10 Jahren zu erwarten. Die relativen Längenänderungen lassen sich jedoch mathematisch beschreiben [4].

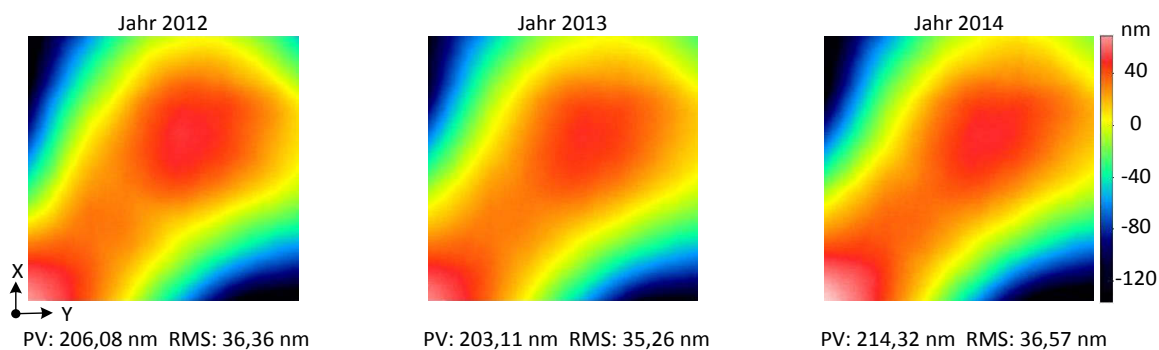


Abbildung 5.21: Ergebnisse der Untersuchungen zur Langzeitstabilität/Formstabilität der z-Messspiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke von Jahr 2012 bis 2014 (Größe von 225 mm x 225 mm)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden empirisch explorative Untersuchungen zur Langzeitstabilität/Formstabilität der z-Spiegelfläche der Raumspiegelecke mittels eines Subapertur-Stitching-Interferometers durchgeführt. Ziel ist es einerseits, die Langzeitstabilität/Formstabilität der z-Spiegelfläche nach dem Einbau der Raumspiegelecke in die NPMM-200 abzuschätzen und andererseits deren Einfluss und Auswirkung auf die voraussichtliche Messunsicherheit der NPMM-200 berechnen zu

können. Aus diesem Grund wurde die z-Messspiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke von 2012 bis 2014 einmal pro Jahr gemessen. Bei Mehrfachmessungen wurde der Mittelwert für das jeweilige Jahr gebildet, bei einmaliger Messung pro Jahr wurde der gleiche Monat gewählt. Die Ergebnisse werden in ihrer zeitlichen Reihenfolge im direkten Vergleich in der folgenden Abbildung 5.21 nebeneinander dargestellt.

Wie in der Abbildung 5.21 zu sehen ist, gibt es keine signifikante Formänderung zwischen den Messergebnissen der z-Messspiegelfläche. Zwischen den beiden am meisten sich unterscheidenden Topographien (Messergebnisse aus den Jahren 2013 und 2014) ergibt sich lediglich eine maximale Differenz von 11,21 nm PV bzw. 0,31 nm RMS. Um diese minimalen Unterschiede zwischen den Messergebnissen zu verdeutlichen, sind in Abbildung 5.22 sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Profilverläufe der in Abbildung 5.21 vorliegenden topographischen Ergebnisse übereinandergelegt dargestellt.

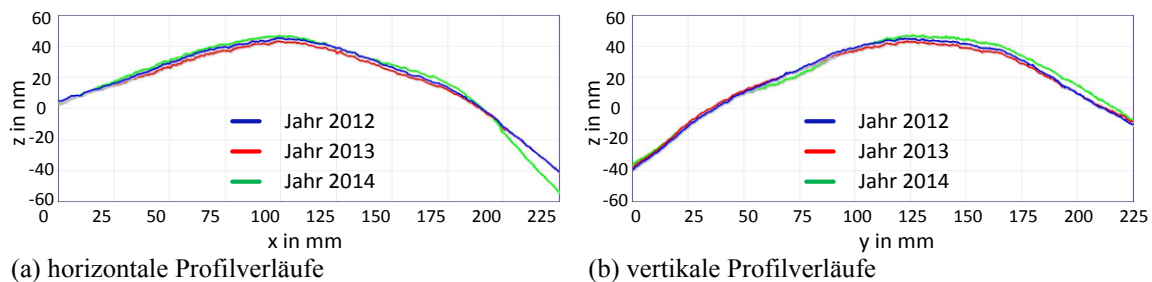


Abbildung 5.22: Vergleich der Messergebnisse mit den Profilschnitten der z-Messspiegelfläche aus Abbildung 5.21 in horizontaler und vertikaler Richtung

Die Abweichungen zwischen den Vergleichsmessungen sind hauptsächlich durch zufällige Abweichungen entstanden. Obwohl zwischen den Messungen mindestens 12 Monate liegen und im letztgenannten Zeitraum der Messaufbau für die Topographiemessung der z-Spiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke komplett in ihre Grundbaugruppen zerlegt und neu justiert wurde, weichen die Messwerte über die Jahre kaum voneinander ab. Das lässt sowohl auf eine sehr gute Langzeitstabilität/Formstabilität der z-Spiegelfläche der NPMM-200-Raumspiegelecke aus Zerodur®-Glaskeramik als auch auf eine gute Wiederholbarkeit der Messungen am Subapertur-Stitching-Interferometer schließen.

## 5.3 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgte die detaillierte Beschreibung des Messprozesses mittels Stitching-Verfahren für Topographiemessungen einer NPMM-200-Raumspiegelecke. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen der x-, y- und z-Spiegelfläche der

Raumspiegelecke wurden im montierten Zustand durchgeführt. Die ermittelten Messwerte bei allen drei zu untersuchenden Messspiegelflächen (x-, y-, z-Messspiegelfläche) liegen unterhalb  $\lambda/2$ .

## **6 Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der Spiegelflächen einer Raumspiegelecke der NMM-1**

### **6.1 Messprinzip und Messaufbau**

Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Bestimmung der Abweichung der Orthogonalität zwischen den Messspiegeln (xy-, xz- und yz-Messspiegel) einer Raumspiegelecke. Wie in Kapitel 2.3 erläutert, existieren zur technischen Winkelmessung grundsätzlich verschiedene Messmethoden und entsprechende Messgeräte (z. B. Goniomat der Firma Möller-Wedel-Optical, Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung mittels Etalon-Platten usw.). Diese unterscheiden sich anhand ihres Aufbaus, des Messbereichs und ihrer Auflösung und sind daher auch nur für jeweils bestimmte Einsatzzwecke einsetzbar. Aber keine dieser Methoden ist für Messungen der Orthogonalitätsabweichungen der xz- und yz-Messspiegelflächen der Raumspiegelecke unter vergleichbaren Bedingungen wie im eingebauten Zustand geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine neue Messmethode entwickelt und umgesetzt, um sowohl die Abweichung der Orthogonalität zwischen den xy-Messspiegelflächen in horizontaler Messrichtung als auch die Abweichung der Orthogonalität zwischen den xz- und yz-Messspiegelflächen in vertikaler Messrichtung im Einbauzustand zu ermitteln. Die neu entwickelte Messmethode eignet sich für Messungen sowohl an der NMM-1 als auch an der NPMM-200-Raumspiegelecke mit ihren um ein Vielfaches größeren Messspiegelflächen.

### Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelflächen

Die neue Messmethode zur Bestimmung der Orthogonalität der xy-Spiegelflächen einer NMM-1-Raumspiegelecke basiert auf dem Prinzip der Differenzmessung von Reflexionswinkeln der verwendeten Pentaprismen zwischen den beiden senkrecht zueinander stehenden ebenen Flächen eines Körpers [52]. Abbildung 6.1a zeigt eine schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelflächen einer NMM-1-Raumspiegelecke.

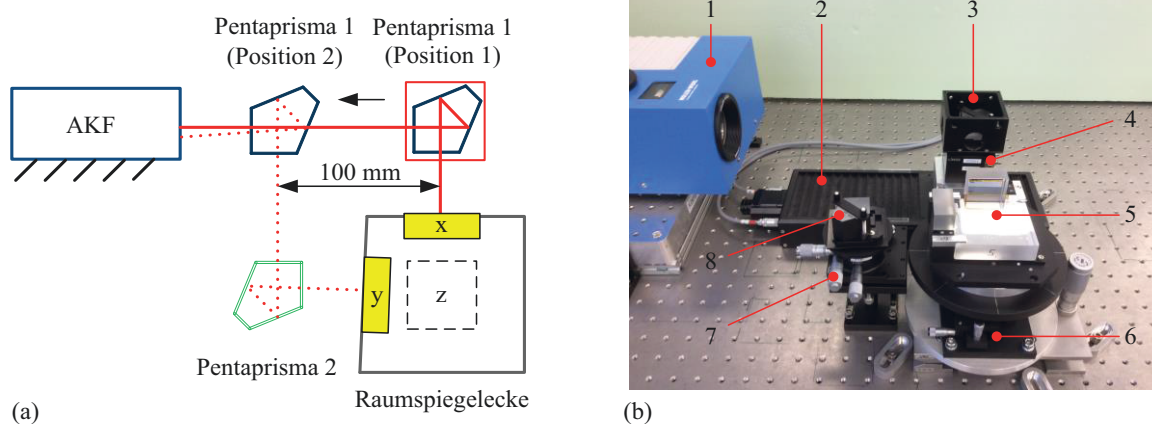


Abbildung 6.1: Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelflächen einer NMM-1-Raumspiegelecke mittels zwei Pentaprismen und eines Autokollimators (AKF): (a) schematische Skizze des horizontalen Messaufbaus: Draufsicht, (b) Foto des Messaufbaus (1 AKF Modell Elcomat HR von Möller-Wedel, 2 Motorisierter Lineartisch, 3 Pentaprisma 1 inkl. Gehäuse, 4 Prismmentisch mit einer Schnell-Justage-Funktion, 5 NMM-1-Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln, 6 Justage für die Raumspiegelecke, 7 Prismmentisch mit integrierten Justageelementen für das Pentaprisma Nr. 2, 8 Pentaprisma 2)

Wie in Abbildung 6.1b zu sehen ist, wurde ein Autokollimator (AKF) Modell Elcomat HR der Firma Möller-Wedel mit höchsten Genauigkeitsansprüchen (Genauigkeit:  $\pm 0,01''$  über jeden  $10''$  Bereich) zur Winkelmessung im Messaufbau eingesetzt. Dazu kommen zwei gegeneinander ausgerichteter Pentaprismen, ein hochpräziser, motorisierter Lineartisch mit 150 mm Stellweg und mehrere Justageelemente. Eine Besonderheit von Pentaprismen ist, dass der Austrittswinkel des Lichtstrahls immer orthogonal zum Eintrittswinkel steht. Somit sind diese optischen Bauelemente invariant gegenüber einer Verkipfung [38]. Allerdings müssen Pentaprismen kalibriert werden [71]. Im Gegensatz zu anderen Verfahren ist dieses Verfahren nicht auf ein extern kalibriertes  $90^\circ$ -Winkelnormale angewiesen, da ein elektronischer AKF zur hochgenauen und rückführbaren Winkelmessung dient.

Um die Genauigkeit des Messergebnisses der horizontalen Winkelmessungen zu erhöhen, wurde vor Beginn der Messung die optische Achse des AKF und des Lineartisches mittels eines zweiten AKF und einer Keilplatte fluchtend zueinander ausgerichtet [101]. Alle optischen Achsen der verwendeten optischen Elemente des Messaufbaus müssen sich in einer gemeinsamen Ebene befinden, um eine erfolgreiche Winkelmessung zu gewährleisten. Zunächst wurde das Pentaprisma 1 exakt planparallel zum x-Spiegel der Raumspiegelecke ausgerichtet. Prinzipiell ist das Pentaprisma nach der Justierung im Hauptschnitt gegen Verkippung bzw. Verdrehung invariant. In der praktischen Anwendung können ideale  $90^\circ$ -Winkel zwischen dem Ein- und Austrittsstrahl aufgrund der Fertigungsabweichungen nicht gewährleistet werden. Je nach Genauigkeitsklasse beträgt die Winkelabweichung des Pentaprismas lediglich einige Winkelsekunden. Wird ein Winkelfehler des Pentaprismas 1  $\varphi_{pp1}$  angenommen, wie in der Abbildung 6.2a dargestellt, so wird der Messstrahl vom AKF ausgehend durch das Pentaprisma 1 um  $90^\circ + \varphi_{pp1}$  abgelenkt, so dass er auf den x-Spiegel der Raumspiegelecke trifft und dort von der Spiegelfläche reflektiert und zum AKF zurückgeworfen worden wird. Der Winkel zwischen Ein- und Austrittsstrahl des AKF beträgt  $2\varphi_{pp1}$ . Dieser Wert wurde mit dem AKF gemessen.

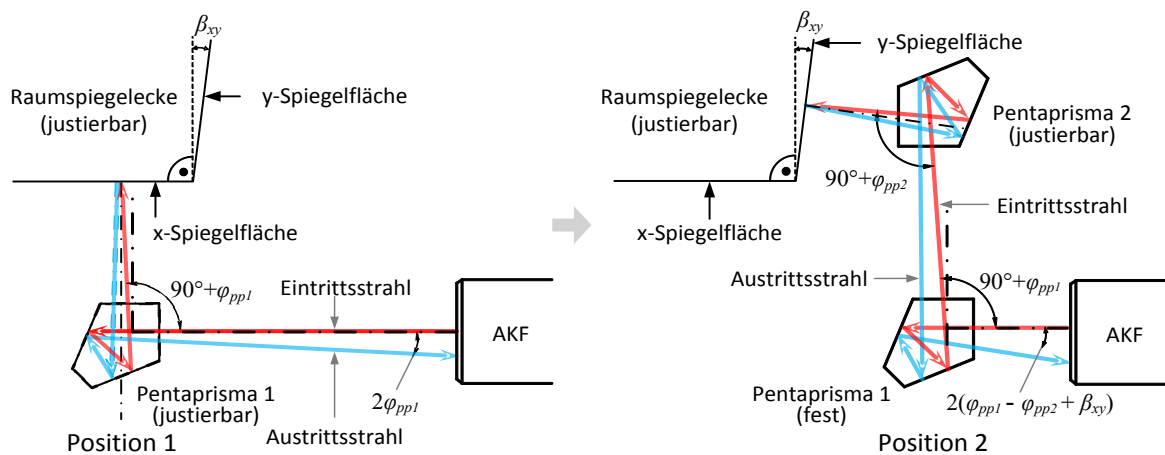


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Orthogonalitätsabweichung der xy-Spiegelflächen einer NMM-1-Raumspiegelecke und der Winkelfehler von Pentaprismen in der Draufsicht: (a) Darstellung des Verlaufs des Strahlenbündels aus dem AKF in Position 1, (b) Darstellung des Verlaufs des Strahlenbündels aus dem AKF in Position 2

Im zweiten Schritt wurde das Pentaprisma 1 mittels des Positioniertisches in Richtung des AKF (x-Richtung) auf die Position 2 verschoben. Zwischen beiden Positionen müssen aus Sicherheitsgründen (Schutzmaßnahme bei der Justierung, um eine mögliche Kollision zwischen dem Pentaprisma 2 und dem y-Spiegel zu vermeiden) mindestens 100 mm Abstand eingehalten werden. In dieser Position wurde das Pentaprisma 2 exakt ausgerichtet, so dass der Messstrahl aus dem AKF durch die beiden Pentaprismen zweimal abgelenkt und durch die y-Spiegelfläche der Raumspiegelecke reflektiert werden kann.

Schließlich wurde die Raumspiegelecke mittels des Justierelements so justiert, dass der Messstrahl in sich durch die beiden Pentaprismen zurückgeworfen werden kann bzw. auf gleichem Weg zurück zum AKF verläuft. Das Pentaprisma 2 ist nach der Feinjustierung im Hauptschnitt wiederum invariant gegenüber einer Verdrehung um die z-Achse. Allerdings gehen an dieser Position die Winkelabweichungen von Pentaprisma 1 und 2 direkt in das Ergebnis ein und verfälschen die gemessenen Messdaten. Bei der Berechnung der Orthogonalitätsabweichung ist zu beachten, dass die Winkelabweichung  $\varphi_{pp1}$  des Pentaprismas 1 an beiden Positionen gleichermaßen auftritt und deswegen kompensiert wird. Im Gegensatz dazu muss die Winkelabweichung  $\varphi_{pp2}$  des Pentaprismas 2 bei der Berechnung jedoch berücksichtigt werden, da dieser lediglich an der zweiten Messposition vorhanden ist. Dieser Winkelfehler wird als systematische Abweichung für das gesamte Winkelmesssystem bezeichnet und muss vor der Messung genau kalibriert werden. Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den x- und y-Spiegeln der Raumspiegelecke ist schließlich nur aus der Differenz der aufgezeichneten Messwerte beider Positionen, abzüglich der Winkelabweichung  $\varphi_{pp2}$  des Pentaprismas 2 zu berechnen, wie in Formel (6.1) beschrieben [101].

$$\beta_{xy} = \Delta X_{AKF} + \varphi_{pp1} - \varphi_{pp1} + \varphi_{pp2} = \Delta X_{AKF} + \varphi_{pp2} \quad (6.1)$$

Dabei bezeichnet  $\beta_{xy}$  die Orthogonalitätsabweichung zwischen den x- und y-Spiegeln der Raumspiegelecke.  $\Delta X_{AKF}$  ist der Differenzwert der vom AKF aufgezeichneten x-Messwerte beider Positionen 1 ( $X_1$ ) und 2 ( $X_2$ ).  $\varphi_{pp2}$  ist hier der Kalibrierwert des Pentaprismas 2.

### **Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den x-, y-Spiegelflächen und der z-Spiegelfläche**

Um Orthogonalitätsabweichungen zwischen den x- und z-Spiegelflächen bzw. y- und z-Spiegelflächen bezüglich des Einbauzustandes zu ermitteln, wurde die Raumspiegelecke im Rahmen dieser Arbeit in einem Insitu-Zustand vermessen, der dem tatsächlichen eingebauten Zustand in der NMM-1 sehr nahe kommt. Aus diesem Grund wurde ein zweiter Messaufbau entworfen, der in Abbildung 6.3b dargestellt ist. Dieser vertikale Messaufbau besteht ebenfalls aus einem AKF, einem motorisierten Lineartisch und zwei Pentaprismen, die allerdings anders angeordnet werden, als bei der im vorherigen Abschnitt vorgestellten horizontalen Winkelmessung. Die Raumspiegelecke mit Drehtisch und das Pentaprisma 2 mit Justagevorrichtung wurden auf einem Gestell mit integrierter Justiereinrichtung montiert. Das Gestell ist mittels Mikroschrauben um zwei Achsen verkippbar, wodurch sich somit auch die Raumspiegelecke bei der Justierung kippen lässt. Außerdem sind beide Pentaprismen auf Prismenentischen befestigt, die eine Kippung um drei



beliebige räumliche Achsen zulassen. Der Abstand zwischen den Bauteilen sollte so klein wie möglich gehalten werden, ohne jedoch die Justierbarkeit zu beeinträchtigen. In diesem Fall wurde wieder ein Abstand zwischen beiden Messpositionen von ca. 100 mm gewählt.

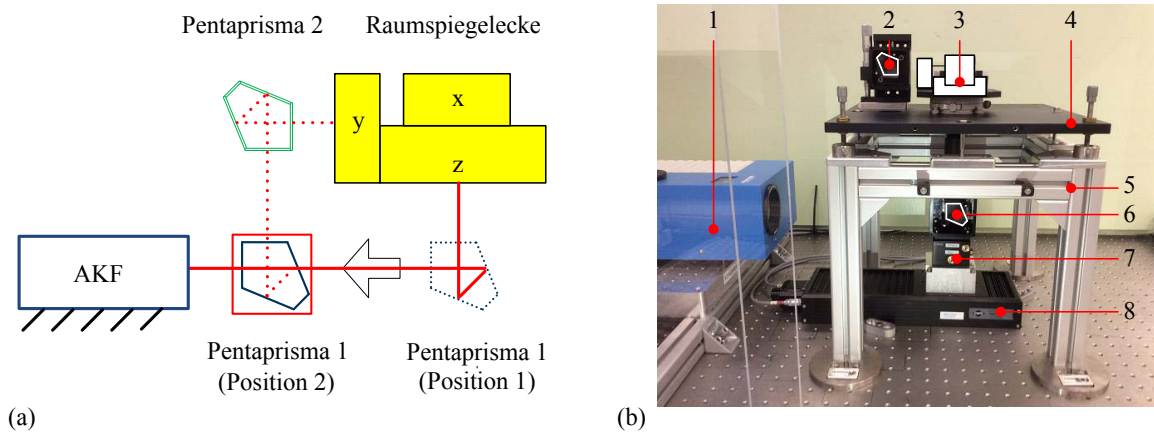


Abbildung 6.3: Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der yz-Spiegelflächen einer NMM-1-Raumspiegelecke mittels zwei Pentaprismen und eines AKF: (a) schematische Skizze des vertikalen Messaufbaus: Seitenansicht, (b) Foto des Messaufbaus (1 Autokollimator Modell Elcomat HR von Möller-Wedel, 2 Pentaprisma 2 inkl. Prismentisch mit einer Schnell-Justage-Funktion, 3 NMM-1-Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln (montiert auf einem Drehtisch), 4 Justiereinrichtung des Gestells, 5 Gestell aus Alu Profil, 6 Pentaprisma 1 inkl. Gehäuse, 7 Prismentisch mit integrierten Justageelementen für das Pentaprisma 1, 8 Motorisierter Lineartisch)

Zunächst wurden das AKF und der Lineartisch fluchtend zueinander angeordnet und fixiert. Anschließend wurde das Pentaprisma 1 optimal eingestellt, so dass der Messstrahl vom AKF ausgehend das Pentaprisma durchläuft, um  $90^\circ$  in vertikale Richtung abgelenkt wird und auf die z-Spiegelfläche der Raumspiegelecke trifft. Von dort aus wird er reflektiert und verläuft durch das Pentaprisma 1 wieder zurück zum AKF. Der Winkel zwischen Ein- und Austrittsstrahl wurde mit dem AKF gemessen. Dieser Wert wurde als Offset für die Berechnung verwendet. Wie in Abbildung 6.3a gezeigt, wurde Pentaprisma 1 als nächstes mittels Lineartisch in die zweite Position gefahren. In dieser Position wurde das Pentaprisma 2 exakt ausgerichtet, dass der Messstrahl aus dem AKF durch die beiden Pentaprismen zweimal abgelenkt und durch die y-Spiegelfläche reflektiert werden kann. Dieser Messwert wurde aufgenommen. Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den y- und z-Spiegeln der Raumspiegelecke ist im Anschluss nur aus der Differenz der aufgezeichneten Messwerte beider Positionen, abzüglich der Winkelfehler  $\varphi_{pp2}$  des Pentaprismas 2 zu berechnen, wie schon bei der Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und der y-Spiegelfläche. Die Berechnung erfolgt nach der Formel (6.1), allerdings ist nun der y-Messwert des AKF ( $\Delta Y_{AKF}$ ) entscheidend. Bei Messung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und der z-Spiegelfläche der Raumspiegelecke wurde der Drehtisch mit der Raumspiegelecke in der

xy-Ebene entgegen dem Uhrzeigersinn um  $90^\circ$  gedreht, damit der Winkel zwischen der z- und x-Spiegelfläche gemessen werden kann. Die Durchführung dieser Messung erfolgt analog zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der y- und der z-Spiegelfläche. Die Winkelabweichung des Pentaprismas 2 geht direkt in das Ergebnis ein und verfälscht die gemessenen Messdaten des AKF. Um diesen Fehler korrigieren zu können, ist ebenfalls eine absolute Kalibrierung des Pentaprismas notwendig. Im nächsten Abschnitt wird ein neues absolutes Kalibrierverfahren für die genaue Bestimmung des Winkelfehlers eines Pentaprismas beschrieben.

## 6.2 Absolute Messfahren zur Kalibrierung von Pentaprismen

Ein Pentaprisma ist ein optisches Bauelement, das eine  $90^\circ$ -Ablenkung eintreffender Lichtstrahlen bewirkt (Abbildung 6.4a). Die Flächen 1 und 2 sind Eintritts- bzw. Austrittsflächen des Strahls. Der Winkel zwischen diesen Flächen beträgt  $90^\circ$ . Die Flächen 3 und 4 sind beschichtet und dienen als Reflektoren. Der Winkel zwischen diesen beiden Flächen beträgt  $45^\circ$ . Erst wenn alle diese Bedingungen erfüllt sind, ist das Pentaprisma im Hauptschnitt invariant. Das bedeutet, dass egal unter welchem Winkel der Strahl in das Pentaprisma einfällt, er stets um  $90^\circ$  abgelenkt wird [43]. In der Regel besitzt jedes Pentaprisma nach der Herstellung eine Schliff-Winkelabweichung  $\delta$ , um den der Anstellwinkel der verspiegelten Reflexionsflächen 3 und 4 um einige Winkelsekunden abweicht, wie in der Abbildung 6.4b dargestellt.

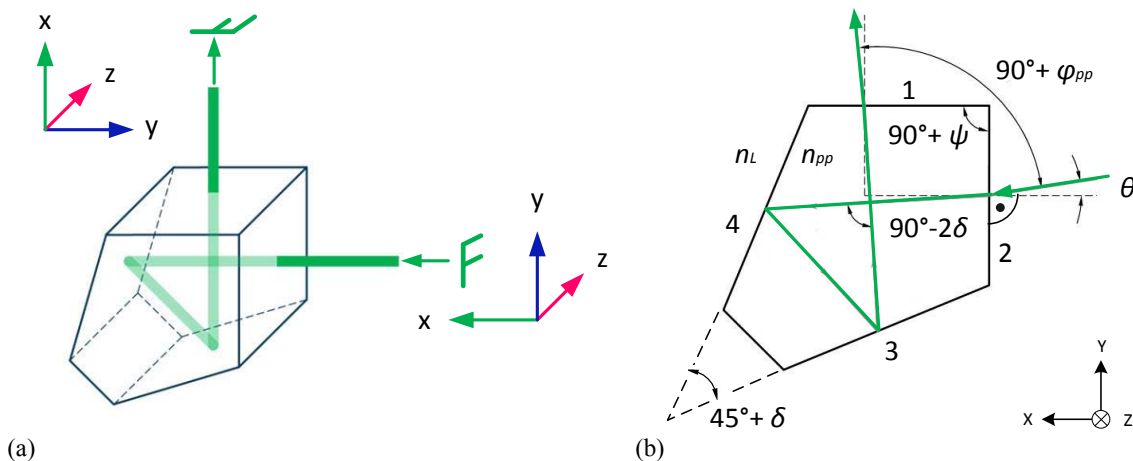


Abbildung 6.4: Pentaprisma: (a) Funktionsschema eines Pentaprismas, (b) Schematische Darstellung der Winkelabweichung  $\varphi_{pp}$  zwischen einfallendem und austretendem Lichtstrahl eines Prismas: Draufsicht [35]

Der Reflexionswinkel innerhalb des Prismas wird aufgrund der Schliff-Winkelabweichung um  $2\delta$  verfälscht. Außerdem wird eine Winkelabweichung  $\psi$  zwischen Strahleintrittsfläche 2 bzw. Strahlaustrittsfläche 1 des Pentaprismas durch Fertigungstoleranzen angenommen. Durch diese geometrischen Abweichungen  $\psi$  und  $\delta$  (Fertigungsabweichungen) des Pentaprismas entsteht eine systematische Winkelabweichung  $\varphi_{pp}$  zwischen einfallendem und austretendem Lichtstrahl. Die Winkelabweichung  $\varphi_{pp}$  ergibt sich im Wesentlichen als eine Funktion von  $\psi$ ,  $\delta$ ,  $\theta$ ,  $n_L$  und  $n_{pp}$ , welche in [71] ausführlich beschrieben ist. Dabei bezeichnet  $\theta$  der Einfallswinkel des einfallenden Lichtstrahls (Richtungsabweichung des Lichtstrahls).  $n_L$  ist der Brechzahl des Umgebungsmediums (normalerweise Luft) und  $n_{pp}$  ist die Brechzahl des Werkstoffes des Prismas. Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt drei Pentaprismen, von denen jeweils zwei im Einsatz sind, mit einer Kantenlänge von 25 mm aus N-BK7 untersucht. Die reflektierenden Flächen des Pentaprismas sind mit Aluminium beschichtet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Untersuchungen zur Bestimmung der Winkelabweichung  $\varphi_{pp}$  der verwendeten Prismen nach einem neuen absoluten Kalibrierverfahren durchgeführt. Abbildung 6.5a zeigt eine schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur horizontalen Kalibrierung von Prismen mittels eines Fizeau-Interferometers.

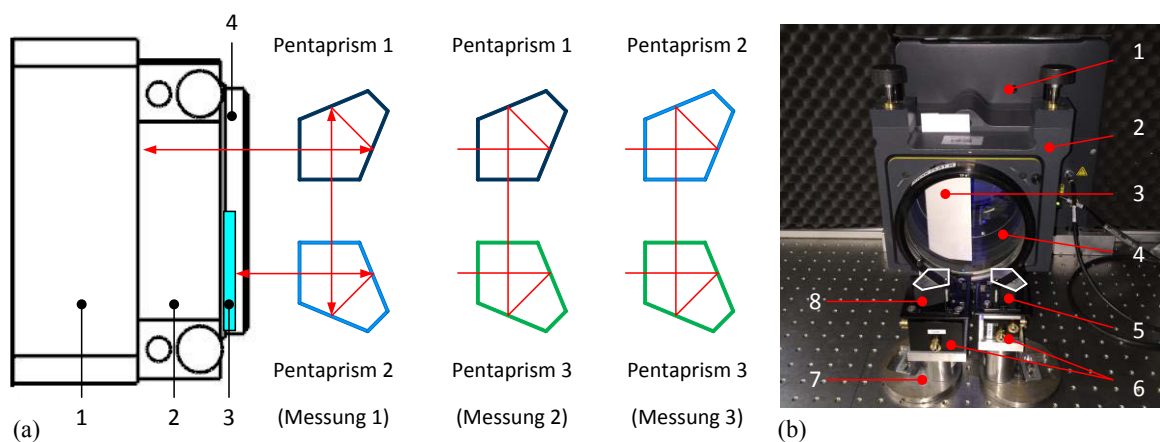


Abbildung 6.5: Prinzip des Drei-Pentaprismen-Tests zur horizontalen Kalibrierung von Pentaprismen: (a) Schematische Darstellung des Messaufbaus [102]: Draufsicht, (b) Foto des Messaufbaus (1 Zygo-Interferometer, 2 Justagerahmen der Transmissionsplatte, 3 Abschattung (Strahlstop-Funktion), 4 Transmissionsplatte des Zygo-Interferometers, 5 Pentaprisma in Position "Referenz", 6 Prismenisch, 7 Gestell, 8 Pentaprisma in Position "Test")

Bei diesem Kalibrierverfahren werden die drei Pentaprismen ebenfalls paarweise relativ zueinander mit einem Fizeau-Interferometer vermessen. Aus den Messdaten werden einzelne Winkelfehler der Pentaprismen mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems absolut bestimmt. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren auch „*three-prism method*“ genannt [102]. Wie in Abbildung 6.5b zu sehen, wurde der Drei-Pentaprismen-Test mit

einem 6-Zoll-Zygo-Interferometer des Typs GPI-XP durchgeführt. Hierzu wurde eine Transmissionsplatte, die einen Reflexionsgrad von 4 % und eine Formabweichung von unter  $\lambda/20$  aufweist, eingesetzt. Um Einflüsse von der Umgebung zu minimieren, wurden die Messungen auf einem schwingungs isolierten Labortisch innerhalb einer Messhaube durchgeführt. Die MetroPro<sup>®</sup>-, „GPI“-Softwareapplikation wurde verwendet, um die erforderlichen Messprozeduren des Drei-Pentaprismen-Tests durchführen zu können. Das Verfahren erfordert drei Messungen (Abbildung 6.5a), und zwar paarweise Prismen-Kombinationen: Prismen 1 und 2 für die erste Messung, Prismen 1 und 3 für die zweite Messung und Prismen 2 und 3 für die dritte Messung mit dem Fizeau-Interferometer. Wie in [108] beschrieben, sollten für jede einzelne Messung die beiden Pentaprismen mittels des Prismentisches so justiert werden, dass sich eine der Ein- bzw. Ausgangsflächen jedes Pentaprismas parallel zur Transmissionsplatte und die andere parallel zum anderen Pentaprisma befindet. Die einzelnen Schritte des Justageprozesses und deren Reihenfolge sind in [58] ausführlich und detailliert beschrieben. Der Drei-Pentaprismen-Test ist bezüglich des Interferometers eine Doppelpass-Messung bei der die Messempfindlichkeit gegenüber einer Single-Pass-Messung doppelt so hoch ausfällt. In diesem Fall durchlaufen die Messstrahlen die Pentaprismen zweimal. Wie in Abbildung 6.5a dargestellt, wird der Messstrahl des Zygo-Interferometers zunächst durch beide Pentaprismen in Richtung der Transmissionsplatte reflektiert. Dann durchläuft der Messstrahl diese und wird durch eine halb vor die Transmissionsplatte geschobene Abschattung blockiert. Schließlich durchläuft der an der Oberfläche der Transmissionsplatte reflektierte Strahlanteil wiederum die Pentaprismen und wird dann wieder in den optischen Weg des Zygo-Interferometers zurückreflektiert. Aus den Messdaten können mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems die Winkelabweichungen ermittelt werden. Die gemessenen Winkel  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  und  $\theta_3$  als Resultate der Überlagerung der Winkelabweichungen von den beiden Pentaprismen der drei Messungen setzen sich wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned}
 \text{M1: } 2(\varphi_{PP_1} + \varphi_{PP_2}) &= \theta_1 \\
 \text{M2: } 2(\varphi_{PP_1} + \varphi_{PP_3}) &= \theta_2 \\
 \text{M3: } 2(\varphi_{PP_2} + \varphi_{PP_3}) &= \theta_3
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

wobei  $\varphi_{pp1}$ ,  $\varphi_{pp2}$  und  $\varphi_{pp3}$  die einzelnen Winkelabweichungen der zu prüfenden Pentaprismen 1, 2 und 3 beschreiben. Das Gleichungssystem besitzt genau eine Lösung:

$$\begin{aligned}\varphi_{PP_1} &= \frac{\theta_1 + \theta_2 - \theta_3}{4} \\ \varphi_{PP_2} &= \frac{\theta_1 + \theta_3 - \theta_2}{4} \\ \varphi_{PP_3} &= \frac{\theta_2 + \theta_3 - \theta_1}{4}\end{aligned}\tag{6.3}$$

Um zuverlässigere Aussagen über das Ergebnis des Experimentes gewährleisten zu können, wurden die drei nötigen Einzelmessungen des Drei-Pentaprismen-Tests jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt. Die Messergebnisse bzw. Messunsicherheiten sind in Tabelle 6.1 angegeben.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der horizontalen Kalibrierung der Pentaprismen aus Abbildung 6.5 (bestimmt aus drei Relativmessungen, Messung 1 bis Messung 3)

Bezeichnung des Pentaprismas	Winkelabweichung $\varphi_{ppi}$ in "	Messunsicherheit in " ( $k = 2$ )
Pentaprisma 1 ( $\varphi_{pp1}$ )	-1,32	0,05
Pentaprisma 2 ( $\varphi_{pp2}$ )	-13,31	0,04
Pentaprisma 3 ( $\varphi_{pp3}$ )	-5,91	0,03

Wie in Abbildung 6.3b dargestellt, wurden die Pentaprismen für die Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den x- und z-Spiegelflächen bzw. den y- und z-Spiegelflächen auch in vertikaler Richtung montiert. Durch die aus dem Eigengewicht der Pentaprismen resultierenden Durchbiegungen und die Auswirkungen der unterschiedlichen Einspannungen der Prisma-Fassung in horizontaler und vertikaler Lage kann sich der Winkelfehler des Pentaprismas ändern. Um diese bleibende Veränderung der Winkelabweichung des Pentaprismas zu bestimmen, wird die Kalibrierung ebenfalls in vertikaler Messrichtung durchgeführt.

Ein wesentlicher Vorteil des hier verwendeten Drei-Pentaprismen-Tests im Vergleich zu bisher üblichen Kalibrierverfahren, wie Messverfahren des NIST (*National Institute of Standards and Technology, USA*) zur Kalibrierung von Pentaprismen mittels zwei zueinander fluchtend angeordneten AKF und zwei parallel zueinander stehenden Spiegeln [71] oder Kalibrierung von Pentaprismen mittels eines Winkelmessers (Goniometer) [59],

besteht gerade darin, dass es sowohl in horizontaler Messrichtung als auch in vertikaler Messrichtung angewendet werden kann.

Die Konfiguration der Messung in vertikaler Messrichtung ist die gleiche, wie zuvor bei der Kalibrierung von Prismen in horizontaler Messrichtung. Die Messergebnisse sind in Tabelle 6.2 angegeben.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der vertikalen Kalibrierung der Pentaprismen (bestimmt aus drei Relativmessungen, Messung 1 bis Messung 3)

Bezeichnung des Pentaprismas	Winkelabweichung $\varphi_{ppi}$ in " (vertikal)	Winkelabweichung $\varphi_{ppi}$ in " (horizontal)	Differenz $\Delta\varphi_{ppi}$ in "
Pentaprisma 1 ( $\varphi_{pp1}$ )	-0,52	-1,32	0,80
Pentaprisma 2 ( $\varphi_{pp2}$ )	-12,60	-13,31	0,71
Pentaprisma 3 ( $\varphi_{pp3}$ )	-5,06	-5,91	0,85

Die Ergebnisse aus Tabelle 6.2 und ihr Vergleich mit den Ergebnissen aus Tabelle 6.1 haben bewiesen, dass die Winkelabweichung der zu kalibrierenden Pentaprismen in horizontaler und vertikaler Lage sich systematisch und nur minimal verändern. Die Winkelabweichung der Pentaprismen in vertikaler Lage verändert sich durchschnittlich um 0,78".

### 6.3 Justageprozeduren und zugehörigen Parametern

Die möglichen und potentiell auftretenden Abweichungen bei der Kalibrierung der Pentaprismen sind Störeinflüsse infolge der Reflexionen der Pentaprismen, die das Messsignal des Interferometers überlagern können. Außerdem hängt die Güte der Messdaten aus der interferometrischen Phasenmessung besonders von den Umweltbedingungen (Vibrationen und Luftturbulenzen) im Messlabor ab. Um solche Messabweichungen bei der Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der Spiegelflächen einer Raumspiegelecke zu minimieren und geringere Messunsicherheiten zu erreichen, ist eine sorgfältige Justierung der Pentaprismen bzw. der Raumspiegelecke erforderlich. Das Ziel der Feinjustierung sollte dabei sein, dass das Pentaprisma in Position 1 bzw. die beiden Pentaprismen in Position 2 bezüglich des durch die Messachsen und den Messstrahl des AKF definierten Referenzkoordinatensystems sehr exakt ausgerichtet werden. Somit kann das fehlerreduzierende Potenzial des Pentaprismas optimal genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren (Roll- und Gierwinkel-Test-

Verfahren [36]), das von der PTB entwickelt wurde, zur hochgenauen Winkeljustage aller optischen Bauteile (Pentaprismen und Raumspiegelecke) des Messaufbaus relativ zum AKF verwendet.

### Roll- und Gierwinkel-Test

Der „Roll- und Gierwinkel-Test“ ist der wichtigste Bestandteil der Pentaprismen-Justage. Der Strahlverlauf (vgl. Abbildung 6.6) wurde mit Hilfe eines Raytracing-Programmes simuliert und die Formeln zur Berechnung der V- und H-Messwinkel des AKF wurden wie folgt ermittelt [35]:

$$V = -\alpha_{PP}^2 + \alpha_{AKF}(\alpha_{PP} - \gamma_{PP} - \alpha_{SP}) + \alpha_{SP}(\alpha_{PP} + \gamma_{PP}) - (\beta_{SP} - \beta_{AKF}) \quad (6.4)$$

$$H = \alpha_{SP} - \alpha_{AKF} + \gamma_{PP} - \gamma_{AKF} \quad (6.5)$$

Dabei repräsentieren die Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  die Roll-, Nick- und Gierwinkel. Die Indizes AKF, PP und SP bezeichnen hier das AKF, das Pentaprisma und den Seitenspiegel der Raumspiegelecke. Es lässt sich anhand dieser Formeln erkennen, dass der Nickwinkel des Pentaprismas  $\beta_{PP}$  keinen Einfluss auf die V- und H-Messwinkel des AKF hat.

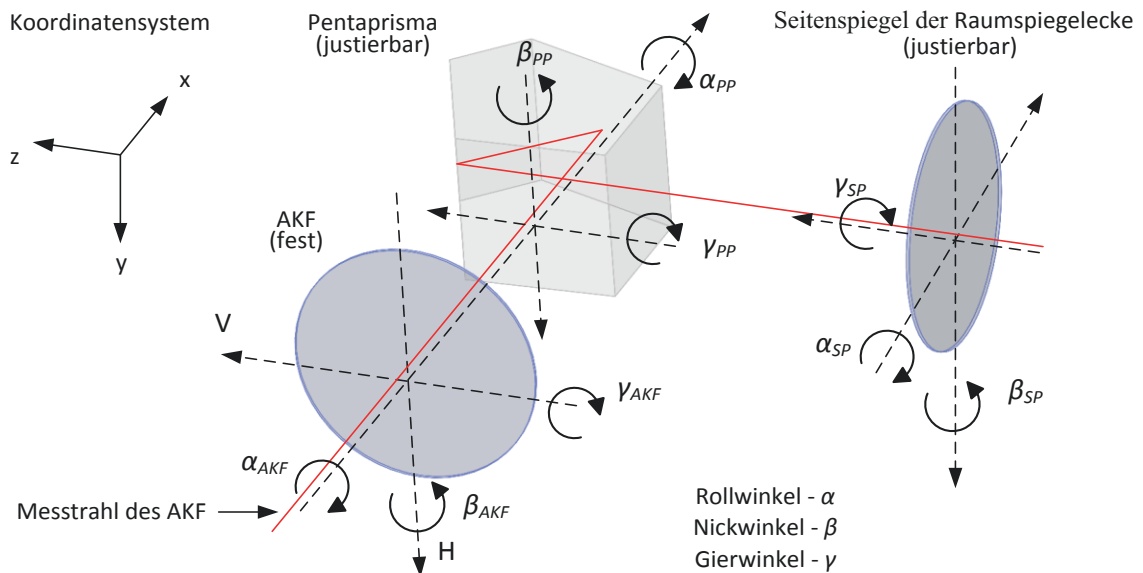


Abbildung 6.6: Strahlengang zur Erläuterung der optimalen Justierung des Pentaprismas 1 in Position 1 (bezogen auf die Abbildung 6.1)

Zuerst wird der „Gierwinkel-Test“ durchgeführt. Dabei wird zunächst der Gierwinkel des Pentaprismas  $\gamma_{PP}$  um  $\pm 300''$  mit konstanter Schrittweite von  $20''$  variiert, wobei die Horizontal- und Vertikalmesswinkel des AKF,  $H(\gamma_{PP})$  und  $V(\gamma_{PP})$ , aufgezeichnet werden.

Die Messwerte der Horizontalmesswinkel lassen sich zu einer Geraden verbinden und werden durch die lineare Funktion  $V(H) = a_0 + a_1H$  mit dem Anstieg  $M_{\text{Gier}} = a_0$  beschrieben. Der Anstieg  $M_{\text{Gier}}$  setzt sich aus den Rollwinkeln der Raumspiegelecke  $\alpha_{SP}$  und des AKF  $\alpha_{AKF}$  zusammen, was in Gleichung (6.6) zum Ausdruck kommt [35].

$$M_{\text{Gier}} = \alpha_{SP} - \alpha_{AKF} \quad (6.6)$$

In diesem Fall ist der gesuchte Justageparameter der Anstieg  $M_{\text{Gier}}$  der Best-Fit-Geraden  $M_{\text{Gier}} = a_0$ . Anschließend wird der „Roll-Test“ durchgeführt, wobei während des Tests der Gierwinkel des Pentaprismas nicht verändert werden darf. Der Rollwinkel des Pentaprismas  $\alpha_{pp}$  wird analog zum eben beschriebenen „Gierwinkel-Test“ variiert ( $\pm 300''$  mit konstanter Schrittweite von  $20''$ ). Wenn die Position des Pentaprismas ideal ist, verlaufen die Messpunkte von  $V(H)$  parabelförmig mit  $V(H) = b_0 + b_1H + b_2H^2$ . Somit ist der zweite Justageparameter der Horizontalmesswinkel  $H_{\text{Roll}}$  des Parabelextreimums. Der Ort des Scheitels dieser Parabel errechnet sich nach Ableitung der Parabelgleichung  $V(H)$  und Nullsetzen für  $V'(H)$  durch Auflösung nach  $H_{\text{Roll}}$ . Daraus lässt sich  $H_{\text{Roll}}$  durch Gleichung (6.7) bestimmen.

$$H_{\text{Roll}} = -\frac{b_1}{2b_2} \quad (6.7)$$

Nach Gleichung (6.8) ergibt sich für  $M_{\text{Gier}} = 0$  der Zusammenhang aus Gleichung (6.9) [35].

$$H_{\text{Roll}} = \gamma_{PP} - \gamma_{AKF} + 0.5M_{\text{Gier}} \quad (6.8)$$

$$H_{\text{Roll}} = \gamma_{PP} - \gamma_{AKF} \quad (6.9)$$

Entsprechend dieses Ansatzes erfolgt nun die Justage.

### Durchführung der Justageprozeduren

Zunächst wird der „Gierwinkel-Test“ ausgeführt und die Steigung  $M_{\text{Gier}}$  der linearen Funktion errechnet. Da das AKF fest montiert ist und der gesamte Aufbau danach ausgerichtet wird, gilt:  $\alpha_{AKF} = 0$  und somit nach Gleichung (6.6):

$$M_{\text{Gier}} = \alpha_{SP} \quad (6.10)$$

Der Rollwinkel des Messobjekts  $\alpha_{SP}$  ist nun um den Wert des Winkels  $M_{\text{Gier}}$  zu korrigieren. Anschließend kann mittels erneutem „Gierwinkel-Test“ geprüft werden, ob nun  $M_{\text{Gier}} = 0$ ,



also ob der Anstieg der Funktion  $V(H)$  nahezu Null ist, was Abbildung 6.7a veranschaulicht. Damit wird das Pentaprisma bezüglich des Gierwinkels relativ zum Messstrahl des AKF ausgerichtet [35].

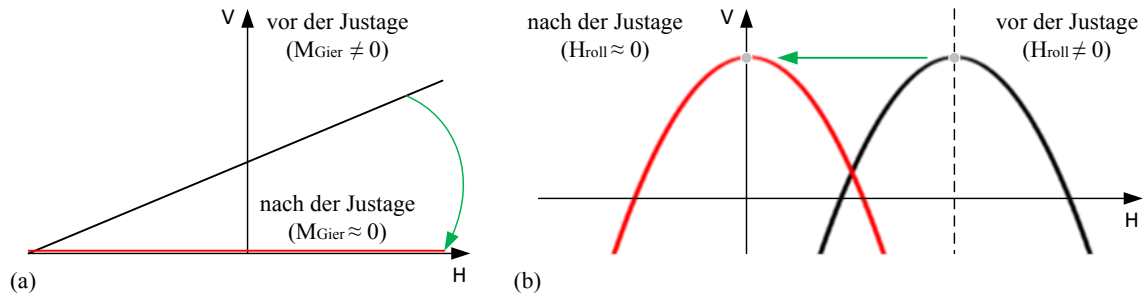


Abbildung 6.7: „Roll- und Gierwinkel-Test“ vor und nach erfolgreicher Justage: (a) „Gierwinkel-Test“, (b) „Rollwinkel-Test“

Nun folgt der „Rollwinkel-Test“ inklusive der Berechnung von  $H_{\text{Roll}}$ . Da das AKF als Referenz-Koordinatensystem fungiert, ist auch  $\gamma_{AKF} = 0$ , wodurch sich die Gleichung (6.9) wie folgt vereinfachen lässt:

$$H_{\text{Roll}} = \gamma_{PP} \quad (6.11)$$

Das bedeutet, dass der Gierwinkel des Pentaprismas um den Wert des Winkels  $H_{\text{Roll}}$  zu korrigieren ist. Nachdem der „Rollwinkel-Test“ erneut durchgeführt wurde, sollte  $H_{\text{Roll}}$  nahezu Null sein, also die Parabel achsensymmetrisch zur V-Achse (vgl. Abbildung 6.7b). Als Nächstes wird der Rollwinkel des Pentaprismas  $\alpha_{PP}$  so justiert, dass der vom AKF angezeigte V-Wert nahezu Null ist, was Abbildung 6.7b veranschaulicht. Damit wird das Pentaprisma nun bezüglich des Rollwinkels relativ zu den H- und V-Messachsen des AKF ausgerichtet. Während des letzten Justageschritts wird lediglich der Vertikalmesswinkel  $V$  des AKF mittels Justage des Nickwinkels der Raumspiegelecke  $\beta_{SP}$  auf Null eingestellt. Schließlich können mit dieser Prozedur die Seitenspiegel der Raumspiegelecke und das AKF bezüglich des Nickwinkels zueinander ausgerichtet werden. Diese Justageprozedur ist evtl. mehrfach zu wiederholen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen.

### Experimentelle Ergebnisse

Die in Abbildung 6.8 beinhalteten Messergebnisse zeigen einerseits den „Gier- und Rollwinkel-Test“ vor und andererseits nach erfolgreicher Endjustage der optischen Komponenten des Messaufbaus.

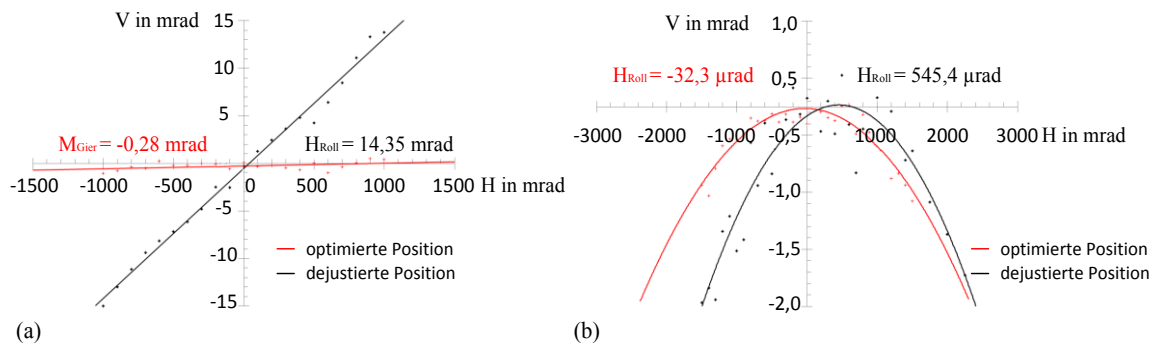


Abbildung 6.8: Ergebnisse des „Roll- und Gierwinkel-Tests“ vor und nach erfolgreicher Justage (bezogen auf die Abbildung 6.6): (a) „Gierwinkel-Test“, (b) „Rollwinkel-Test“

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Werte des Justageparameters  $M_{\text{Gier}}$  bzw.  $H_{\text{Roll}}$  nach nahezu optimaler Endjustage stark minimiert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Tabelle 6.3: Ergebnisse des „Roll- und Gierwinkel-Tests“ aus Abbildung 6.8

	Funktion $V(H)$ in rad	Justageparameter in rad
„Gierwinkel-Test“	$V(H) = 3 \cdot 10^{-4}H - 3 \cdot 10^{-7}$	$M_{\text{Gier}} \approx 3,23 \cdot 10^{-5}$
„Rollwinkel-Test“	$V(H) = -0,63H^2 + 4 \cdot 10^{-5}H - 3 \cdot 10^{-8}$	$H_{\text{Roll}} \approx 2,81 \cdot 10^{-4}$

Wie bereits im Kapitel 6.1 erwähnt, können die Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Spiegeln der Raumspiegelecke durch die Verschiebung des Pentaprismas 1 entlang des vom AKF ausgehenden Messstrahls bestimmt werden. Der Ablenkwinkel des beweglichen Pentaprismas ist dabei nur robust gegenüber Abweichungen in dessen Winkelerorientierung, welche unvermeidlich durch Führungsabweichungen des Lineartisches während der Verschiebung entstehen ( $\Delta\gamma_{pp}$  und  $\Delta\alpha_{pp}$ ) [35]. Diese werden als Abweichungseinflüsse wirksam. Um Abweichungseinflüsse auf das Messergebnis mit Hilfe der ermittelten  $V(H)$  Gleichungen in Tabelle 6.3 berechnen zu können, werden die Führungsabweichungen des Lineartisches zwischen beiden Messpositionen genau ermittelt. Abbildung 6.9 zeigt zwei Messsysteme zur Abweichungsmessung der Führung. Mittels eines Fizeau-Interferometers werden die Roll- und Gierwinkelabweichungen des zu untersuchenden Lineartisches zwischen beiden Messpositionen (Abstand: 100 mm) bestimmt. Die Nickwinkelabweichung des Lineartisches kann mittels eines AKF genau bestimmt werden. Daraus ergibt sich eine Rotation des Pentaprismas 1 im Rollwinkel  $\alpha_{pp}$  von  $145 \mu\text{rad}$  (ca.  $30''$ ) bzw. im Gierwinkel  $\gamma_{pp}$  von  $48,5 \mu\text{rad}$  (ca.  $10''$ ) während der Messung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Messspiegeln. Diese Abweichung kann, je nach Koordinatensystem des Messgeräts, in beiden Richtungen erfolgen. Deshalb wird sie mit  $\pm 145 \mu\text{rad}$  bzw.  $\pm 48,5 \mu\text{rad}$  angegeben. Somit ergeben sich Abweichungen im

Vertikalmesswinkel  $V$  des AKF von  $\pm 0,25 \mu\text{rad}$  (ca.  $\pm 0,05''$ ), die durch die Gierwinkeländerung  $\Delta\gamma_{pp}$  hervorgerufen worden sind. Durch die Rollwinkeländerung  $\Delta\alpha_{pp}$  entstehen ebenfalls Abweichungen im Vertikalmesswinkel  $V$ . Diese betragen  $\pm 0,03 \mu\text{rad}$  (ca.  $\pm 0,01''$ ).

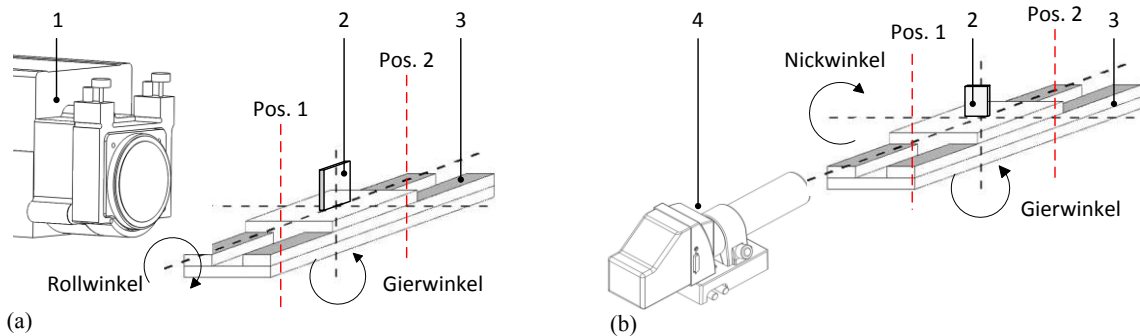


Abbildung 6.9: Messsystem zur Führungsfehlermessung: (a) Messung der Winkelverkipfung eines beweglichen Spiegels mittels eines Fizeau-Interferometers, (b) Messung der Winkelverkipfung eines beweglichen Spiegels mittels eines AKF (1 Fizeau-Interferometer, 2 Basisspiegel mit justierbaren Halterung, 3 Lineartisch, 4 AKF)

## 6.4 Ergebnis und Auswertung

### Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelflächen

Um die Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{xy}$  zwischen der x- und y-Spiegelfläche ermitteln zu können, wird der Kalibrierwert des Pentaprismas 2  $\varphi_{pp2}$  und die Differenz der aufgezeichneten Messwerte des AKF beider Positionen  $\Delta X$  benötigt (vgl. Abbildung 6.2). In diesem Fall beträgt die Differenz zwischen beiden X-Messwerten des AKF  $0,91''$  bzw. die Winkelabweichung des Pentaprismas 2  $-1,32''$  (vgl. Tabelle 6.1). Die Berechnung erfolgt nach der Formel (6.1) in Abschnitt 6.1. Die aus 10 wiederholten Messungen gemittelte Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{xy}$  zwischen der x- und y-Spiegelfläche mit Korrektur systematischen Abweichung von  $\varphi_{pp2}$  beträgt dabei  $-0,41''$  und kann mit einer erweiterten Unsicherheit  $U(\beta_{xy})$  von  $0,023''$  ( $k = 2$ ) angegeben werden. Dieser Wert liegt wesentlich unterhalb der zulässigen Fertigungstoleranzen von  $< 2''$ .

Um die Unsicherheit der Messung der Orthogonalitätsabweichung mittels Pentaprismen abschätzen zu können, wurde eine Vergleichsmessung, bei der die beiden Pentaprismen in ihrer Position ausgetauscht wurden (Pentaprisma 1 befindet sich nun in Position 2 und Pentaprisma 2 wurde auf dem Lineartisch montiert, vgl. Abbildung 6.1a), durchgeführt. Im Gegensatz dazu ist die Winkelabweichung  $\varphi_{pp1}$  des Pentaprismas 1 für die Winkelmessung als systematische Abweichung des gesamten Winkelmesssystems zu betrachten. Die Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelfläche ist im Anschluss nur aus

der Differenz ( $12,89''$ ) der aufgezeichneten Messwerte beider Positionen, abzüglich der Winkelabweichung  $\varphi_{pp1}$  des Pentaprismas 1 ( $-13,31''$ ) zu berechnen. In diesem Fall beträgt die Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{xy}$  mit Korrektur der systematischen Abweichung von  $\varphi_{pp1}$   $-0,42''$ . Die Differenz beider Ergebnisse der xy-Orthogonalitätsabweichung  $\Delta\beta_{xy}$  beträgt lediglich  $0,1''$ .

Als Ursache für die verbliebenen Abweichungen (bezüglich der oben genannten Vergleichsmessung) sind im Wesentlichen geringe Restabweichung bei den absoluten Verfahren zur Kalibrierung der Pentaprismen und zufällige Messabweichungen bei der Durchführung der Winkelmessungen zu nennen.

### Orthogonalitätsabweichung zwischen der x-/y-Spiegelflächen und z-Spiegelfläche

Die Berechnung der Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{xz}$  zwischen der x- und z-Spiegelfläche und  $\beta_{yz}$  zwischen der y- und z-Spiegelfläche erfolgt analog zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelfläche. Die Berechnung erfolgt ebenfalls nach der Formel (6.1), allerdings ist nun der y-Messwert des AKF ( $\Delta Y_{AKF}$ ) entscheidend. Die aus 10 wiederholten Messungen gemittelten Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{xz}$ ,  $\beta_{yz}$  und  $\beta_{xy}$  sind in Tabelle 6.4 angegeben.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Untersuchungen der Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{xz}$ ,  $\beta_{yz}$  und  $\beta_{xy}$

	Orthogonalitätsabweichung in"	Messunsicherheit $U$ in " ( $k = 2$ )
$\beta_{xz}$	-0,07	0,021
$\beta_{yz}$	2,54	0,017
$\beta_{xy}$	-0,41	0,023

Die ermittelten Messwerte der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den xy- und xz-Messspiegeln ( $\beta_{xy}$ ,  $\beta_{xz}$ ) liegen unterhalb der Fertigungstoleranz von  $< 2''$ . Der Wert der Orthogonalitätsabweichung zwischen den y- und z-Messspiegeln liegt jedoch geringfügig oberhalb der Fertigungstoleranz. Dies ist nicht kritisch, weil die ermittelten Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Messspiegeln der Raumspiegelecke als systematische Abweichung im Betrieb der NMM-1 rechnerisch in Echtzeit korrigiert werden können.

## 6.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgte die detaillierte Beschreibung des Messprozesses für die Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den xy, xz und yz-Messspiegeln einer NMM-1-Raumspiegelecke mit angesprengten Seitenspiegeln. Das neuartige Messverfahren basiert auf Differenzmessungen von Reflexionswinkeln der Pentaprismen zwischen den beiden senkrecht zueinander stehenden ebenen Flächen eines Körpers und ist im Vergleich zu anderen Verfahren besonders geeignet für die Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen der xz- und yz-Spiegeln im montierten Zustand. Da bei diesem Verfahren die Winkelabweichungen der verwendeten Pentaprismen direkt in das Gesamtmessergebnis eingehen, wurden diese durch eine absolute Kalibrierung mittels eines Fizeau-Interferometers ermittelt und später zur Korrektur verwendet, um die systematischen Abweichungen zu beseitigen. Darüber hinaus wurden Absolutverfahren (Drei-Pentaprismen-Test) zur Kalibrierung der verwendeten Pentaprismen sowohl in horizontaler Messrichtung als auch in vertikaler Messrichtung detailliert erläutert. Durch den beschriebenen Kalibriervorgang wurden die Winkelabweichungen der Pentaprismen hochpräzise bestimmt. Außerdem wurden in diesem Kapitel die Justageprozeduren und zugehörige Parameter der Pentaprismen dargestellt. Damit werden die möglichen Messabweichungen bei der Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der Spiegelflächen minimiert und eine geringere Messunsicherheit erreicht. Die maximale Messunsicherheit bei der Untersuchung der Orthogonalitätsabweichungen ( $\beta_{xy}$ ,  $\beta_{xz}$  und  $\beta_{yz}$ ) zwischen den Bezugsebenen der x-, y- und z-Spiegelflächen liegt bei 0,02".

## **7 Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der Spiegelflächen einer Raumspiegelecke der NPMM-200**

### **7.1 Bestimmung der Orthogonalität der xy-Spiegelflächen**

Das im letzten Kapitel beschriebene Messverfahren zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen einer NMM-1 mittels eines hochgenauen AKF und zweier Pentaprismen ist aufgrund des begrenzten Tubusdurchmessers des AKF (Messbereich  $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ) nur bedingt auch für eine NPMM-200-Raumspiegelecke geeignet. Zudem begrenzen die eingesetzten Pentaprismen den Messbereich, deren Ein- und Austrittsflächen nur  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  messen. Die Messspiegelflächen der NPMM-200-Raumspiegelecke betragen jedoch  $200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  für die x- und y-Spiegel und  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  für den z-Spiegel. Somit sind die zu untersuchenden Messflächen wesentlich größer als das Messfeld des Messaufbaus zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung einer NMM-1, wodurch die Spiegelflächen der Raumspiegelecke während einer Winkelmessung mit einem solchen Messaufbau nicht vollständig erfasst werden können. Aus diesem Grund wurde das für die Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen der NMM-1-Raumspiegelecke verwendete Messprinzip für die NPMM-200-Raumspiegelecke modifiziert.

Für den Messaufbau zur Orthogonalitätsmessung mit erweitertem Messbereich stand ein hochpräziser XY-Verschietisch mit jeweils  $300 \text{ mm}$  Stellweg in jede Richtung zur Verfügung. Der Justageaufwand während des Messvorgangs sollte sehr gering gehalten werden. Damit kann der Zeitaufwand für die Winkelmessungen deutlich reduziert werden und die Einflüsse von Umweltänderungen auf das Messergebnis können durch kürzere

Messzeiten minimiert werden. Abbildung 7.1 illustriert das Messprinzip zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelfläche einer NPMM-200-Raumspiegelecke. Die xy-Orthogonalitätsabweichung wird mit einem 90°-Winkelmesssystem bestimmt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen ursprünglicher und aktueller Version des Messsystems liegt darin, dass das neu entwickelte Messsystem ein 90°-Winkelnormale benötigt. Der Grund dafür ist, dass je nach Ausrichtung des verwendeten Strahlteilers nicht sichergestellt werden kann, ob der Winkel zwischen dem abgelenkten Messstrahl und der optischen Achse des AKF noch genau 90° beträgt. Deshalb wurde ein Halbwürfelprisma als 90°-Winkelnormale verwendet. Die Höhe des verwendeten Halbwürfelprismas beträgt 75 mm. Das Halbwürfelprisma wurde vorher mit einem Fizeau-Interferometer sehr genau kalibriert, um die systematischen Abweichungen zu korrigieren. Der Rechtwinkligkeitsfehler  $\varphi_{HP}$  des Halbwürfelprismas beträgt -0,92" [58].

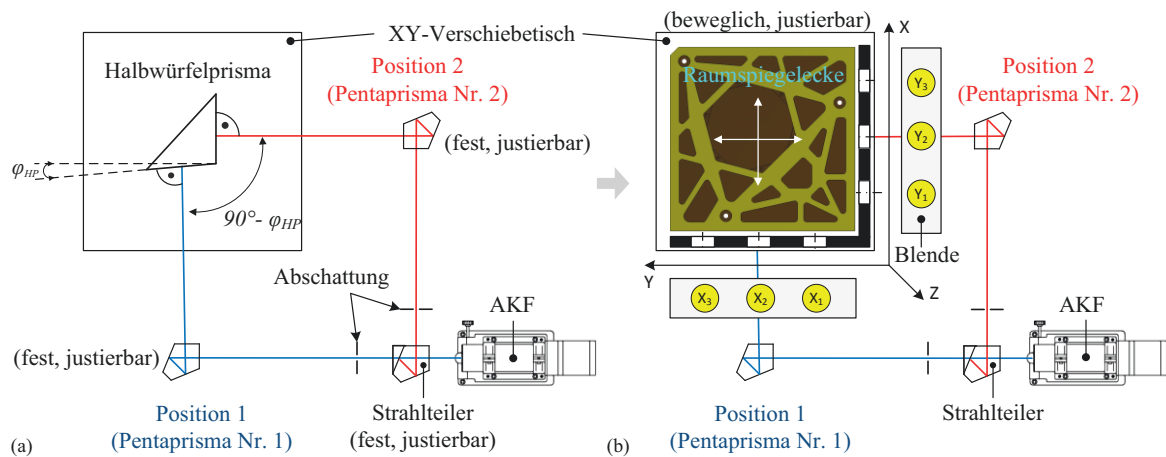


Abbildung 7.1: Messprinzip zur experimentellen Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelfläche einer NPMM-200-Raumspiegelecke: (a) schematische Darstellung der Einrichtung des 90°-Winkelmeßsystems mittels zwei Pentaprismen und eines kalibrierten Halbwürfelprismas mit einer Rechtwinkligkeitsabweichung von  $\varphi_{HP}$ ; Draufsicht, (b) schematische Skizze des horizontalen Messaufbaus: Draufsicht

Wie in Abbildung 7.1a ersichtlich, wird der Messstrahl des AKF durch einen Strahlteiler teils durchgelassen (blau markiert), teils jedoch um 90° reflektiert (rot markiert). Beide Teilstrahlen (blau und rot markiert) treffen jeweils auf eine der beiden vollständig reflektierenden Seitenflächen (Kathetenflächen) des Halbwürfelprismas und gelangen von dort wieder jeweils auf gleichem Wege zurück zum AKF. Die optischen Bauteile des Messsystems werden so justiert, dass die optische Achse des AKF senkrecht zu beiden Seitenflächen des Halbwürfelprismas steht. Hier wurden die Justageprozeduren mittels Roll- und Gierwinkel-Test (vgl. Kapitel 6.3) angewandt. Die Neigungswinkel beider Flächen zum AKF werden separat gemessen. Um eine Störung durch die Überlappung der beiden zurückgeworfenen Strahlengänge auf dem Messsignal des AKF bestmöglich zu

verhindern, wird bei der Winkelmessung einer der beiden Flächen der Strahlengang zur jeweils anderen Fläche durch eine Abschattung blockiert und umgekehrt. In der Tat hat das verwendete Halbwürfelprisma einen Pyramidalfehler, d. h. eine Abweichung vom rechten Winkel, der zwischen Bezugsfläche und Seitenfläche eines Halbwürfelprismas liegt. Bei einer eingehenden Analyse des Pyramidalfehlers auf den Strahlenverlauf, was in Kapitel 8.2 ausführlich beschrieben ist, wurde festgestellt, dass er kaum Auswirkungen auf das Ergebnis der Orthogonalitätsabweichung hat. Deshalb wurde der Pyramidalfehler des Halbwürfelprismas bei der Messung sowie bei der Justierung nicht betrachtet. Es werden also nur die angezeigten X-Messwerte beider Strahlenverläufe (durch Position 1 und 2) für die Berechnung verwendet.

Nach erfolgreicher Justage sollte idealerweise nur der kalibrierte Wert  $\varphi_{HP}$  des Halbwürfelprismas als Differenz zwischen den aufgezeichneten x-Messwerten beider Reflexionsflächen auf dem Display des AKF angezeigt werden. In der Praxis ist dies jedoch schwer umzusetzen. Der Grund dafür ist, dass eine präzise Justierung der optischen Bauteile auf den Kalibrierwert des Normalprismas mit Sub-Winkelsekunden-Genauigkeit technisch extrem schwierig und zeitaufwendig ist [58]. Es wird lediglich ein Differenzwert zwischen dem Messergebnis der Winkelmessungen und dem bekannten Kalibrierwert des Normalprismas angezeigt. Deshalb wird dieser Wert als Korrekturwert  $\varphi_K$  für das 90°-Winkelmeßsystem verwendet. Der Korrekturwert kann nach Gleichung (7.1) berechnet werden und wird als systematische Abweichung des 90°-Winkelmeßsystems betrachtet.

$$\varphi_K = \varphi_{HP} - \Delta X_{AKF} \quad (7.1)$$

Dabei bezeichnet  $\Delta X_{AKF}$  die Differenz zwischen den aufgezeichneten X-Messwerten der Winkelmessungen aus den beiden Messpositionen.

Anschließend wird das Halbwürfelprisma aus dem 90°-Winkelmeßsystem entfernt und stattdessen die zu untersuchende Raumspiegelecke inkl. Justageeinrichtung für die Winkelverstellung im Messaufbau montiert. Wie in Abbildung 7.1b zu sehen ist, wird der gesamte Messvorgang in Einzelmessungen (Winkelmessung zwischen den  $X_i$ - und  $Y_i$ -Teilsegmenten des x- und y-Spiegels) aufgeteilt. Die Teilsegmente des x- und y-Spiegels werden mittels des XY-Verschiebetisches bzw. der beiden Pentaprismen relativ zur Apertur des AKF jeweils so positioniert, dass am Ende des kompletten Messvorgangs die einzelnen Orthogonalitätsabweichungen zwischen den x- und y-Teilsegmenten vollständig ermittelt werden können. Im Vorfeld der Untersuchungen wurde für die x-, y-Spiegel jeweils eine Blende gefertigt, um einzelne Segmente des x-, y-Spiegels als Messpositionen präzise zu definieren. Die Teilsegmente sind kreisförmig mit einem Durchmesser von 25 mm und an die strahlbegrenzenden Ein- und Austrittsflächen der Pentaprismen



angepasst. Die Teilsegmente haben in der Ebene der Blende einen Abstand von 100 mm voneinander, so dass sich ein Abstand der beiden äußeren Messpositionen von 200 mm ergibt. Die Winkelmessung wird nacheinander an den beiden Messpositionen (zwischen den Teilsegmenten des x- und y-Spiegels) durchgeführt, wobei der Strahlenverlauf der jeweils anderen Messposition mit Hilfe der entsprechenden Abschattungen blockiert wird und umgekehrt. Dabei wurden die neun nötigen Einzelmessungen (3x3 Segmente) jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt, um zufällige Fehler zu minimieren. Das Winkelmesssystem ist extrem empfindlich gegenüber Vibrationen und Luftturbulenzen. Aus diesem Grund wurden die Winkelmessungen unter einer Schutzhaube auf einem schwingungs isolierten Messtisch unter gleich bleibenden Laborbedingungen, wie schon bei der Topographiemessung der NPMM-200-Raumspiegelecke, durchgeführt (vgl. Abbildung 7.2). Um weitere zusätzliche Abweichungen zu vermeiden, dürfen die Lagen sämtlicher optischer Bauteile des Messsystems und des AKF während der Messungen nicht verändern werden.

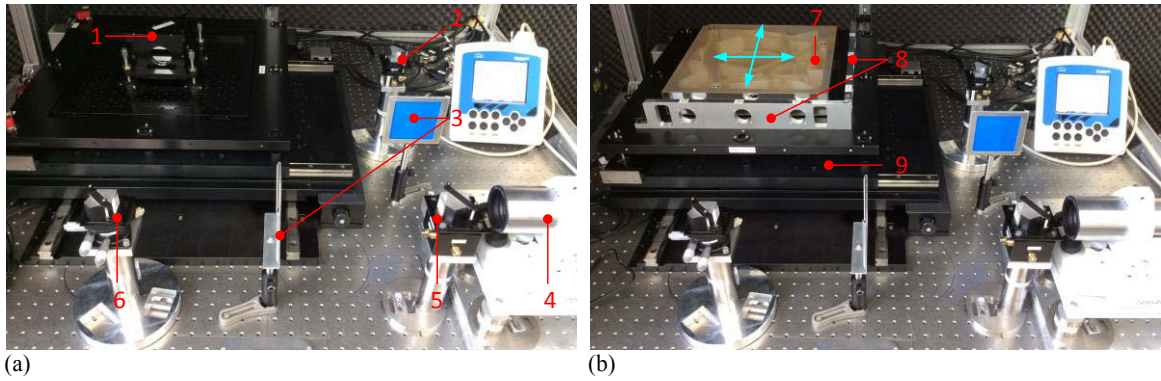


Abbildung 7.2: Fotos des Messaufbaus zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelfläche einer NPMM-200-Raumspiegelecke: (a) Einrichtung des 90°-Winkelmesssystems mittels zweier Pentaprismen und eines kalibrierten Halbwürfelprismas, (b) Messaufbau zur Bestimmung der xy-Orthogonalitätsabweichung (1 Halbwürfelprisma als 90°-Winkelnormale, 2 Pentaprisma 2 in Position 2, 3 Abschattung, 4 AKF, 5 Pentaprismenstrahlteiler, 6 Pentaprisma 1 in Position 1, 7 NPMM-200-Raumspiegelecke, 8 Blende, 9 XY-Verschiebetisch)

Der gemessene abweichungsbehaftete Gesamtwinkel  $\delta_{x_i y_i}$  der Einzelmessung lässt sich nach folgender Gleichung berechnen.

$$\delta_{x_i y_i} = X_{2_i} - X_{1_i} \quad (7.2)$$

Dabei sind  $X_{1_i}$  und  $X_{2_i}$  die gemessenen X-Messwerte des AKF der jeweiligen Segmente  $i$  ( $i$  von 1 bis 3) des x- und y-Spiegels in Position 1 und Position 2. Der Korrekturwert  $\varphi_K$  muss als systematische Abweichung von allen Messergebnissen abgezogen werden. Somit lässt sich die tatsächliche Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{x_i y_i}$  zwischen den paarweisen

Segmenten  $x_i y_i$  des x- und y-Spiegels gemäß Gleichung (7.3) aus dem Gesamtwinkel  $\delta_{x_i y_i}$  und dem Korrekturwert des Messsystems  $\varphi_K$  berechnen.

$$\beta_{x_i y_i} = \delta_{x_i y_i} - (-\varphi_K) \quad (7.3)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die in Gleichungen (7.1) bis (7.3) verwendeten Winkelwerte alle mit dem realen Vorzeichen in Bezug auf das Koordinatensystem des Messaufbaus behaftet sind.

Schließlich werden die einzelnen Messdaten der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Teilsegmenten des x- und y-Spiegels softwareseitig zusammengefasst und analysiert, um die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der x-, y-Spiegelflächen der Raumspiegelecke zu ermitteln.

### Ergebnis und Auswertung

Die Mittelwerte der xy-Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{x_i y_i}$  zwischen den einzelnen Segmenten des x- und y-Spiegels und die entsprechenden erweiterten Messunsicherheiten sind Tabelle 7.1 zu entnehmen.

Tabelle 7.1: Mittelwerte der Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{x_i y_i}$  und erweiterte Messunsicherheiten der einzelnen Messpositionen  $X_i Y_i$

Orthogonalitätsabweichungen $\beta_{x_i y_i}$ in "				Messunsicherheit in " ( $k = 2$ )			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$		$X_1$	$X_2$	$X_3$
$Y_1$	-1,07	-1,06	-1,06	$Y_1$	0,02	0,02	0,02
$Y_2$	-1,04	-1,09	-1,02	$Y_2$	0,02	0,02	0,02
$Y_3$	-0,81	-0,90	-0,83	$Y_3$	0,02	0,02	0,01

Aus den Ergebnissen der Teilmessungen  $\beta_{x_i y_i}$  wurde der Mittelwert  $\overline{\beta_{x_i y_i}}$  berechnet, um die Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{xy}$  zwischen den Bezugsebenen der x-, y-Spiegelflächen zu charakterisieren. Diese beträgt  $-0,98'' \pm 0,02''$ .

#### 7.1.1 Messtechnische Verifikation des Algorithmus zur Winkelmessung

Die Messung der Orthogonalitätsabweichung wird einerseits durch die Geometrie der Raumspiegelecke beeinflusst andererseits von der Topographie dieser Flächen (intrinsische Winkelabweichung) [33], wie in Abbildung 7.3 dargestellt.

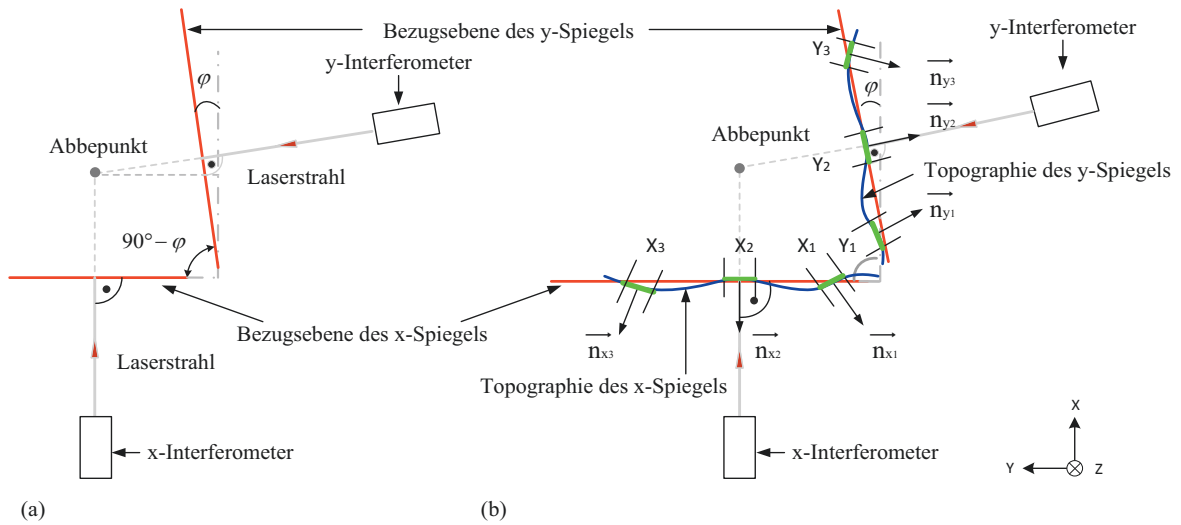


Abbildung 7.3: Orthogonalitätsabweichung: (a) beruht auf der Geometrie der Raumspiegelecke, (b) Überlagerung von Orthogonalität und Formabweichung (Topographie) der Raumspiegelecke

Der Mittelwert  $\overline{\beta_{x_i y_i}}$  der Messergebnisse der gemessenen xy-Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{x_i y_i}$  repräsentiert die globale Winkelabweichung zwischen den Bezugsebenen des x- und y-Spiegels (vgl. Abbildung 7.3).

Die lokalen Topographieabweichungen der Spiegeloberfläche führen dazu, dass das Messergebnis der Orthogonalitätsabweichung in Abhängigkeit von der betrachteten Position variieren kann. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, stets dieselbe Position (Mittelpunkt) auf den Segmenten des x- und y-Spiegels der Raumspiegelecke zu messen, was durch definierte Anlagepunkte und die Form der Segmente gewährleistet wird. Zunächst wurden die Topographien der x- und y-Spiegelflächen der Raumspiegelecke mittels des Subapertur-Stitching-Verfahrens gemessen. Die gemessenen Topographien (vgl. Abbildung 7.3b) der x- und y-Spiegelflächen werden unter Berücksichtigung der definierten Anlagepunkte und des global ermittelten Winkelfehlers  $\overline{\beta_{x_i y_i}}$  in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt.

Aus den überführten Topographien werden für jede Koordinatenachse jeweils drei Kreissegmente ( $\varnothing = 25 \text{ mm}$ ) der korrespondierenden Messpositionen  $X_1$  bis  $X_3$  und  $Y_1$  bis  $Y_3$  definiert und daraus segmentweise die mittleren Normalenvektoren bestimmt (vgl. Abbildung 7.4). Je zwei mittlere Normalenvektoren  $\vec{n}_{x_i}, \vec{n}_{y_i}$  werden auf die z-Ebene projiziert und der Winkel zwischen diesen projizierten Normalenvektoren  $\beta_{Tx_i Ty_i}$  berechnet. Die Projektion ist nötig, um Einflüsse der Pyramidal- und Kardanabweichung vor Beginn der Messung zu eliminieren.

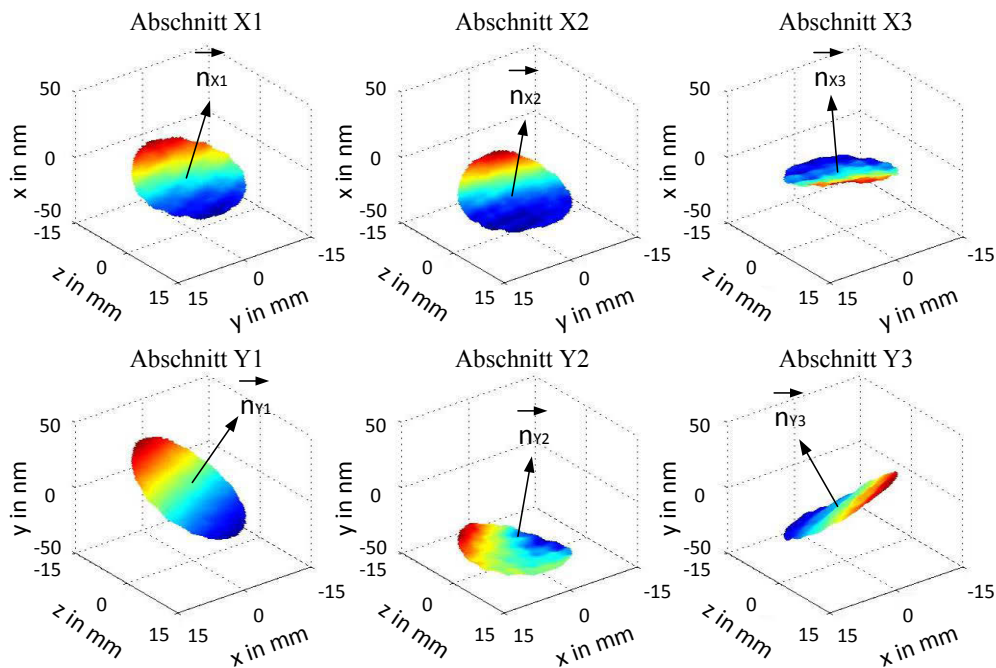


Abbildung 7.4: Einzelne Topographiesegmente des x- und y-Spiegels der NPM-200-Raumspiegelecke

Die Ergebnisse der berechneten xy-Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{Bx_iy_i}$  unter Berücksichtigung der Topographie der Spiegelflächen sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst. Die Werte sind jeweils relativ von X-Segment zum Y-Segment zu sehen (Differenzen der X-Y-Normalenvektoren zu einander).

Tabelle 7.2: Berechnete Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{Bx_iy_i}$  der einzelnen Messpositionen

Orthogonalitätsabweichung $\beta_{Bx_iy_i}$ in "				Differenzwert ( $\beta_{x_iy_i} - \beta_{Bx_iy_i}$ ) in "			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Y <sub>1</sub>	-1,20	-1,21	-1,10		-0,1	-0,1	-0,04
Y <sub>2</sub>	-1,11	-1,13	-1,02		-0,07	-0,04	0
Y <sub>3</sub>	-0,81	-0,82	-0,73		0	+0,08	+0,1

Aus den Ergebnissen der Teilmessungen  $\beta_{Bx_iy_i}$  wurde die mittlere Orthogonalitätsabweichung  $\overline{\beta_{Bx_iy_i}}$  berechnet. Diese beträgt -1,01". Der Unterschied zwischen den beiden Ergebnissen ( $\overline{\beta_{Bx_iy_i}}$  und  $\overline{\beta_{x_iy_i}}$ ) ist sehr gering, die Differenz beträgt 0,03". Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass die Topographie des x- bzw. y-Spiegels aufgrund ihrer Homogenität nur einen geringen Einfluss auf die Winkelmessung hat. Damit wurde der Algorithmus zur Winkelmessung messtechnisch verifiziert. Die ermittelte Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{xy}$  ( $\overline{\beta_{x_iy_i}}$ ) zwischen den Bezugsebenen der x- und y-

Spiegelflächen werden als systematische Abweichungen im Betrieb der NPM-200 rechnerisch in Echtzeit korrigiert. Aus diesem Winkelwert  $\beta_{xy}$  und den Topographiedaten kann für jeden Punkt des x- bzw. y-Spiegels die Ableitung des Winkels ( $\partial y / \partial x \cdot (x)$  für den x-Spiegel und ( $\partial x / \partial y \cdot (y)$  für den y-Spiegel) präzise berechnet werden.

## 7.2 Bestimmung der Orthogonalität der xz-/ yz-Spiegelflächen

Für die Messung der xz- und yz-Orthogonalitätsabweichung wird das gleiche Messverfahren angewandt, das bereits zu Beginn des Kapitels 6.1 erläutert worden ist, mit dem Unterschied, dass der gesamte Messvorgang in Einzelmessungen (Winkelmessung zwischen den  $x_i$ -,  $y_i$ - und  $z_i$  Teilsegmenten des x-, y- und z-Spiegels) aufgeteilt wird.

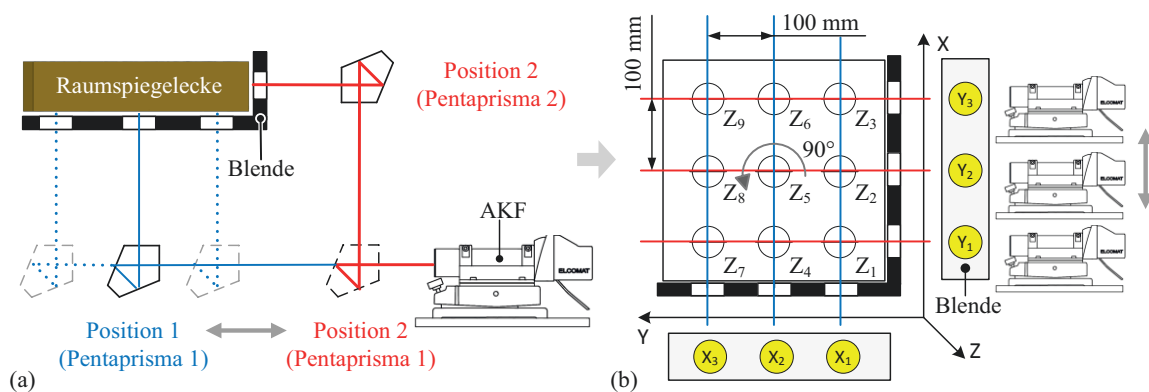


Abbildung 7.5: Messprinzip zur Bestimmung der xz- und yz-Orthogonalitätsabweichung einer NPM-200-Raumspiegelecke mittels zwei Pentaprismen und eines AKF: (a) schematische Skizze des vertikalen Messaufbaus: Seitenansicht, (b) Ablauf der gesamten Messprozedur: Draufsicht

Da zur Bestimmung der xy-Orthogonalitätsabweichung auf jedem Seitenspiegel jeweils drei Messpositionen gewählt worden sind, ergibt sich für den z-Spiegel eine Anzahl von neun Messpositionen, um den gesamten Bereich der z-Spiegelfläche optimal abdecken zu können. In Abbildung 7.5b sind die Bezeichnungen und die Lage der Messpositionen zueinander dargestellt. Nachdem alle neun Teilsegmente der z-Spiegelfläche in dieser Ausrichtung gemessen sind, wird die Raumspiegelecke mittels des verstellbaren Grundadapters um 90° um deren vertikale Achse (z-Achse) gedreht. Damit kann die ganze Messprozedur für die zweite der beiden seitlichen Spiegelflächen wiederholt werden, um sowohl die yz- als auch die xz-Orthogonalitätsabweichungen ermitteln zu können. Aufgrund der großen Dimensionen der NPM-200-Raumspiegelecke bzw. des Messaufbaus wird ein XY-Positioniersystem mit einem Stellweg von mindestens 400 mm für die Winkelmessungen benötigt. Daher wurden die Winkelmessungen mit dem Mehrkoordinaten-Direktantriebssystem (MKDA) des Instituts für Mikroelektronik und

Mechatronik-Systeme (IMMS) durchgeführt. Der MKDA hat einen Verfahrbereich von 400 mm x 400 mm und eine Bahn- und Positioniergenauigkeit von 1  $\mu\text{m}$  [47].

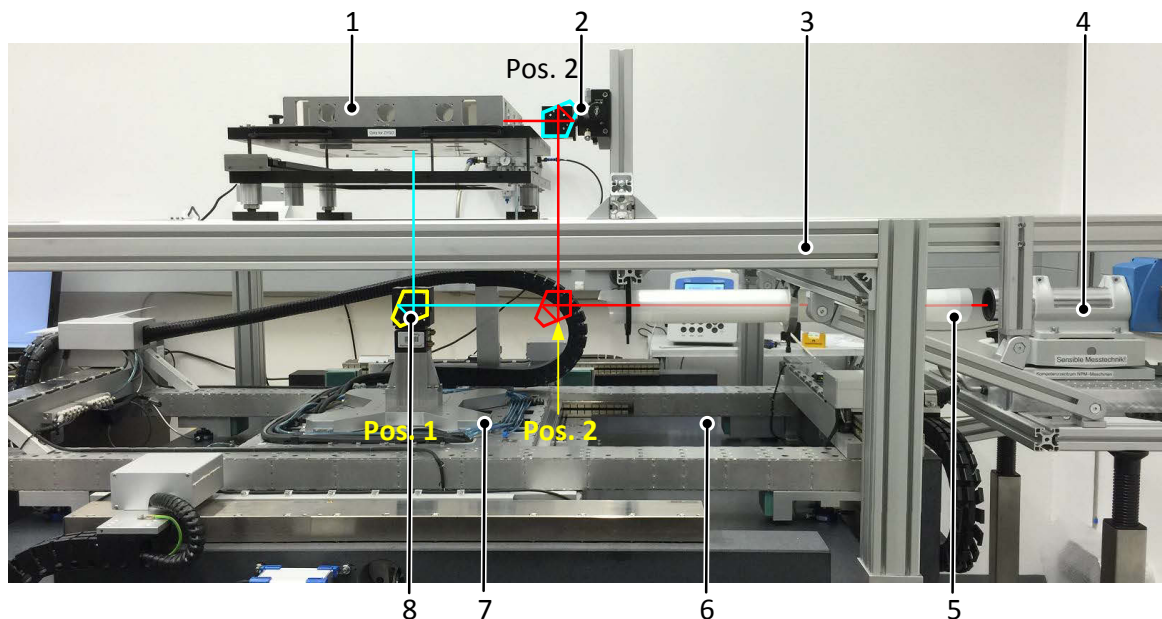


Abbildung 7.6: Foto des Messaufbaus zur experimentellen Bestimmung der yz-Orthogonalitätsabweichung einer NPMM-200-Raumspiegelecke: 1 NPMM-200-Raumspiegelecke inkl. Justage und x-, y- und z-Blende, 2 oberes Pentaprisma 2 inkl. Justage und Gehäuse auf einem manuellen Positioniertisch, 3 Alu-Profilrahmen, 4 AKF (Modell Elcomat 3000 von Möller-Wedel), 5 Abschirmrohr (Schutz gegen Luftturbulenzen), 6 Mehrkoordinaten-Direktantriebssystem (MKDA), 7 Läufer des MKDA, 8 unteres Pentaprisma 1 inkl. Justage und Gehäuse

Abbildung 7.6 zeigt das Foto des Messaufbaus zur Bestimmung der yz-Orthogonalitätsabweichung einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels zweier Pentaprismen und eines AKF. Die Führungsfehler (Gier- und Rollfehler) des MKDA wurden im Vorfeld geprüft, um ihren Einfluss auf die Ergebnisse der Winkelmessungen ermitteln können, was in Kapitel 8 detailliert beschrieben ist. Das verwendete AKF Modell Elcomat 3000 von Möller-Wedel mit einer Messunsicherheit von  $\pm 0,1''$  über jeden 20'' Bereich [60] wurde an einem verlängerten Profilrahmen außerhalb des MKDA befestigt. Die Raumspiegelecke inkl. aller Aufstell- und Justierelemente steht in der Mitte auf dem tragenden Profilrahmen und die Mitte des z-Spiegels befindet sich genau in der Mitte des Arbeitsbereichs des MKDA. Das obere Pentaprisma 2 inkl. Prismenstisch mit integrierten Justageelementen und manuellem Linear-Präzisionstisch wird an den vertikalen Profilen so befestigt, dass die Höhe des Mittelpunktes des Pentaprismas 2 mit der Höhe der Blendenöffnung der y-Spiegel übereinstimmt. In diesem Fall wird die Winkelabweichung des Pentaprismas als systematische Abweichung des gesamten Winkelmesssystems bezeichnet, wie bei der Messung der yz-Orthogonalitätsabweichung der NMM-1-Raumspiegelecke (vgl. Kapitel 6.1). Das untere Pentaprisma 1 inkl. Justage ist auf dem Läufer des MKDA befestigt und befindet sich auf der Höhe der optischen Achse des AKF.



Alle optischen Bauteile werden optimal sowohl um die horizontale als auch um die vertikale Drehachse zueinander ausgerichtet, um mit dem Messaufbau Winkelmessungen durchführen zu können, deren Wiederholbarkeit im Subwinkelsekundenbereich liegen [58]. Das bedeutet, dass die optische Achse des AKF, die Führungssachse des MKDA und die Mittelachse, die durch alle drei Blendenmittelpunkte der z-Spiegelfläche einer Messreihe verlaufen, nach erfolgreicher Justage exakt fluchtend zueinander sind. Der einzelne Justageprozess und deren Reihenfolge mittels Roll- und Gierwinkel-Tests sind bereits in Kapitel 6.3 beschrieben worden. Um eine Messreihe komplett aufnehmen zu können, sollte das Pentaprisma 1 mit dem Läufer des MKDA in die entsprechenden Messpositionen fahren. Die Blendenöffnungen des z-Spiegels sind 100 mm voneinander entfernt. Die ganze Verfahrlänge des Läufers des MKDA während einer Messreihe beträgt 380 mm. Nach Durchführung einer Messreihe wird das AKF mit den beiden Pentaprismen quer zu dessen optischer Achse verschoben und anschließend werden alle Schritte wiederholt, um eine weitere Messreihe an der y- und z-Spiegelfläche aufzuzeichnen. Schließlich werden die Orthogonalitätsabweichungen zwischen allen Kreissegmenten der y- und z-Spiegelfläche vollständig ermittelt. Die Umweltbedingungen im IMMS-Messlabor waren relativ instabil. Die Temperaturschwankungen während der Messung betrugen fast bis zu  $\pm 1^\circ\text{C}$  und die Luftturbulenzen im Messraum waren verhältnismäßig groß. Um die Umwelteinflüsse auf die Messergebnisse zu minimieren, wurde der Strahlenverlauf zwischen dem AKF und dem unteren Pentaprisma durch ein Rohr abgeschirmt, wie in Abbildung 7.6 dargestellt. Die neun nötigen Einzelmessungen aus drei Messreihen wurden jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt.

Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Teilsegmenten des y- und z-Spiegels sowie des x- und z-Spiegels der Raumspiegelecke kann im Anschluss aus der Differenz der aufgezeichneten Y-Messwerte beider Positionen abzüglich der Winkelfehler  $\varphi_{pp2}$  des Pentaprismas 2 berechnet werden (vgl. Formel (7.4)).

$$\beta_{z_i} = \Delta Y_{AKF} + \varphi_{pp2} \quad (7.4)$$

Dabei bezeichnet  $\beta_{z_i}$  die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Teilsegmenten des y- und z-Spiegels sowie des x- und z-Spiegels der Raumspiegelecke.  $\Delta Y_{AKF}$  ist der Differenzwert der aufgezeichneten Y-Messwerte vom AKF beider Positionen  $1_i$  ( $Y_{1i}$ ) und  $2_i$  ( $Y_{2i}$ ).  $\varphi_{pp2}$  ist der Kalibrierwert des Pentaprismas 2 in vertikaler Richtung.

Schließlich wurden die einzelnen Messdaten der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Teilsegmenten des y- und z-Spiegels sowie des x- und z-Spiegels softwareseitig zusammengefasst und analysiert, um die Orthogonalitätsabweichung zwischen den

Bezugsebenen der y-, z-Spiegelflächen sowie der x-, z-Spiegelflächen der Raumspiegelecke zu ermitteln.

### Ergebnis und Auswertung

Mit Hilfe der Formel (7.4) kann nun anhand der aufgezeichneten Messergebnisse der yz-Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{y_i z_i}$  zwischen allen neun Messpositionen  $Z_i$  des z-Spiegels und der entsprechenden Position  $Y_i$  des y-Spiegels berechnet werden. Jede Kombination wurde zehnmal gemessen. Die Mittelwerte und die zugehörigen erweiterten Messunsicherheiten sind in Tabelle 7.3 aufgelistet.

Tabelle 7.3: Mittelwerte der Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{y_i z_i}$  und erweiterte Messunsicherheiten der einzelnen Messpositionen  $Y_i Z_i$

Orthogonalitätsabweichungen $\beta_{y_i z_i}$ in "				Messunsicherheit in " ( $k = 2$ )			
	$Z_1$	$Z_4$	$Z_7$		$Z_1$	$Z_4$	$Z_7$
$Y_1$	3,24	3,84	4,54	$Y_1$	0,03	0,02	0,03
	$Z_2$	$Z_5$	$Z_8$		$Z_2$	$Z_5$	$Z_8$
$Y_2$	2,98	3,55	3,91	$Y_2$	0,03	0,04	0,02
	$Z_3$	$Z_6$	$Z_9$		$Z_3$	$Z_6$	$Z_9$
$Y_3$	2,82	3,06	3,22	$Y_3$	0,03	0,03	0,03

Aus den Ergebnissen der Teilmessungen  $\beta_{y_i z_i}$  wurde der Mittelwert  $\overline{\beta_{y_i z_i}}$  berechnet. Die mittlere Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{yz}$  zwischen den Bezugsebenen der y-, z-Spiegelflächen der Raumspiegelecke beträgt  $3,46'' \pm 0,03''$  ( $k = 2$ ).

### xz-Orthogonalitätsabweichung

Auch für die Berechnung der Orthogonalitätsabweichung aus den aufgezeichneten Messergebnissen zwischen allen neun Messpositionen des z-Spiegels  $Z_i$  und der entsprechenden Messposition des x-Spiegels  $X_i$  wird die Formel (7.4) analog verwendet. Die Mittelwerte  $\beta_{x_i z_i}$  der zehn Messungen jeder Messposition und die zugehörigen erweiterten Messunsicherheiten in Tabelle 7.4 aufgelistet.



Tabelle 7.4: Mittelwerte der Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{x_i z_i}$  und erweiterte Messunsicherheiten der einzelnen Messpositionen  $X_i Z_i$

Orthogonalitätsabweichungen $\beta_{x_i z_i}$ ["]				Messunsicherheit ["] ( $k = 2$ )			
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
$X_1$	1,57	2,13	2,96		$X_1$	0,02	0,02
	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$			$Z_4$	$Z_5$
$X_2$	1,74	2,17	2,97		$X_2$	0,03	0,02
	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$			$Z_7$	$Z_8$
$X_3$	2,07	2,27	2,88		$X_3$	0,03	0,03
							$Z_9$
							0,02

Aus den Ergebnissen der Teilmessungen  $\beta_{x_i z_i}$  wurde der Mittelwert  $\overline{\beta_{x_i z_i}}$  berechnet. Die Orthogonalitätsabweichung  $\beta_{xz}$  zwischen den Bezugsebenen der x-, z-Spiegelflächen beträgt  $2,31'' \pm 0,03''$ . Dieser Wert kann als systematischer Fehler im Betrieb der NPM-200 rechnerisch in Echtzeit korrigiert werden.

Die maximale Messunsicherheit bei der Untersuchung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Bezugsebenen der x-, y- und z-Spiegelflächen liegt bei  $0,03''$ . Die ermittelten geometriebedingten Orthogonalitätsabweichungen  $\beta_{xy}$ ,  $\beta_{yz}$  und  $\beta_{xz}$  zwischen den Bezugsebenen der x-, y- und z-Spiegelflächen werden als systematische Abweichungen im Betrieb der NPM-200 rechnerisch in Echtzeit korrigiert.

## 7.3 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel erfolgte die detaillierte Beschreibung des Messprozesses für die Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den xy, xz und yz-Messspiegeln einer NPM-200-Raumspiegelecke.

Im Unterschied zur Bestimmung der xy-Orthogonalitätsabweichung einer NMM-1-Raumspiegelecke dient hier ein rechtwinkliges Halbwürfelprisma als Kalibriernormal. Der gesamte Messvorgang wurde in Einzelmessungen zwischen den  $X_i$ - und  $Y_i$ - Teilsegmenten des x- und y-Spiegels aufgeteilt. Am Ende des kompletten Messvorgangs wurden die einzelnen Orthogonalitätsabweichungen zwischen den x- und y-Teilsegmenten vollständig ermittelt. Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der x-, y-Spiegelflächen der NPM-200-Raumspiegelecke beträgt  $-0,98'' \pm 0,02''$  ( $k = 2$ ). Zur Messung der yz- bzw. xz-Orthogonalitätsabweichung der Raumspiegelecke wurde ein absolutes Messverfahren eingesetzt. Es wurden mit diesem Verfahren die

Orthogonalitätsabweichungen zwischen der y- und z-Spiegelfläche bzw. zwischen der x- und z-Spiegelfläche ermittelt. Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der y-, z-Spiegelflächen beträgt  $3,46'' \pm 0,03''$  ( $k = 2$ ). Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der x-, z-Spiegelflächen beträgt  $2,31'' \pm 0,03''$  ( $k = 2$ ).

## **8      Abweichungsanalyse des Messsystems zur Bestimmung der Formabweichungen einer NPM-200-Raumspiegelecke**

### **8.1    Abweichungsanalyse des Messsystems zur Topographiemessung**

Im folgenden Kapitel werden die Abweichungsquellen bei der Durchführung der Topographiemessung bzw. Winkelmessung einer NPM-200-Raumspiegelecke analysiert und die Messunsicherheit ermittelt. Das Ziel besteht darin, die Effekte von unterschiedlichen Einflüssen zu minimieren, zu kompensieren oder zu korrigieren und eine hohe Genauigkeit des Messergebnisses zu gewährleisten. Zunächst werden die Eigenschaften der einzelnen, für die verschiedenen Messaufgaben verwendeten Messverfahren, Messgeräte und optischen Komponenten untersucht. Dabei wird die Abweichungsanalyse eines Fizeau-interferometrischen Messsystems zur Topographiemessung einer NPM-200-Raumspiegelecke mittels Stitching-Verfahren durchgeführt. Es ist davon auszugehen, dass alle Komponenten Abweichungsquellen beinhalten, so kommt es zu einer Einteilung der wesentlichen Messabweichungen in drei Gruppen mit den einzelnen Abweichungsursachen (vgl. Abbildung 8.1).

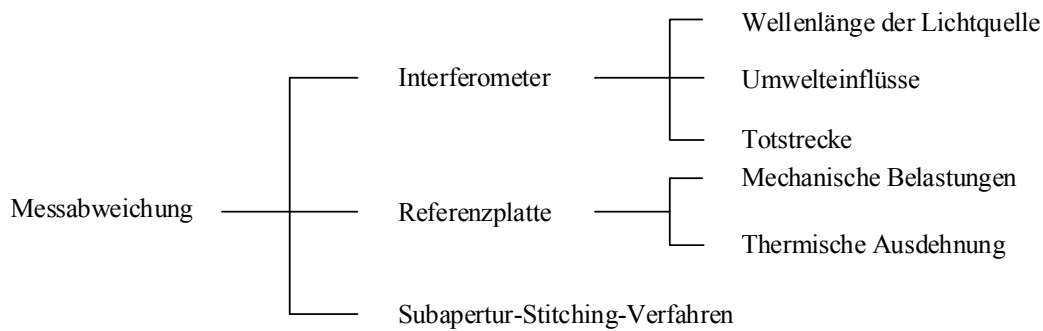


Abbildung 8.1: Unterteilung der Messabweichungsursachen und deren Einflussgrößen bei der Topographiemessung einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels Stitching-Verfahren

### 8.1.1 Messabweichungen bedingt durch Fizeau-Interferometer

#### 8.1.1.1 Wellenlängenänderung durch Umwelteinflüsse

Im Zygo-Interferometer werden Abweichungen durch mögliche Wellenlängenänderung des Lasers, durch Umwelteinflüsse und durch die Totstrecke des Interferometers verursacht. Das Zygo-Interferometer verwendet als Lichtquelle einen He-Ne-Laser, der als Frequenznormal für Interferometer dient. Die Wellenlänge  $\lambda_0$  des He-Ne-Lasers beträgt 632,99 nm im Vakuum. Das Interferometer wird jedoch in Luft verwendet. Die Wellenlänge des He-Ne-Lasers in Luft  $\lambda$  ist von der Vakuumwellenlänge  $\lambda_0$  und von der Brechzahl der Luft  $n$  abhängig (vgl. Formel (8.1)).

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (8.1)$$

Wenn die Vakuumwellenlänge hinreichend genau angegeben wird, so besteht die Möglichkeit, die Luftwellenlänge durch eine Ermittlung der Brechzahl der umgebenden Luft zu bestimmen. Die Brechzahl wird insbesondere durch die Umweltbedingungen Temperatur, Druck und relative Luftfeuchtigkeit beeinflusst (Kohlendioxid-Schwankungen können unberücksichtigt bleiben). Die direkte Messung der Brechzahl mit Hilfe eines Refraktometers ist sehr aufwändig. Deshalb werden die obenstehenden Umweltparameter mittels Parametermethode einzeln gemessen und rechnerisch auf Basis der Edlén-Formel [26] korrigiert. Im Folgenden wird bestimmt, mit welcher Messunsicherheit die Umweltparameter gemessen werden müssen, um eine bestimmte Unsicherheit der interferometrischen Längenmessung zu garantieren. Die Brechzahlabhängigkeit kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden [44]:

$$n = 2,8793 \cdot 10^{-9} \text{Pa}^{-1} \cdot \frac{p}{1 + 0,003671^\circ\text{C}^{-1} \cdot t} - 3,6 \cdot 10^{-10} \text{Pa}^{-1} \cdot p_w + 1 \quad (8.2)$$

Dabei gilt  $t$  für Lufttemperatur in  $^\circ\text{C}$ ,  $p$  für Luftdruck in hPa,  $p_w$  für Partialdruck des Wasserdampfes in Pa. Da der Partialdruck des Wasserdampfes sich nicht direkt messen lässt, wird die relative Luftfeuchtigkeit  $RH$  gemessen. So kann daraus bei Kenntnis der Temperatur der Partialdruck des Wasserdampfes wie folgt berechnet werden [99]:

$$p_w = RH \cdot 611,213 \cdot \frac{17,5043 \cdot t}{241,2 + t} \cdot e^{\frac{17,5043 \cdot t \cdot 10^{-2}}{241,2 + t}} \quad (8.3)$$

Dabei wird  $RH$  in % angegeben. Die Topographiemessung einer NPMM-200-Raumspiegelecke wurde in einem klimatisierten Messraum innerhalb einer geschlossenen Messhaube durchgeführt, so dass mit dem Fizeau-Interferometer (Marke Zygo) in einem Temperaturbereich von  $20^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ K}$  gemessen wurde. Die relative Luftfeuchtigkeit lag in einem Bereich von  $50\% \pm 5\%$ . Die Luftdruckschwankung während der Topographiemessung betrug über eine Messdauer von 4 Stunden ca.  $\pm 1 \text{ hPa}$  (vgl. Abbildung 5.14). Zur Bestimmung der relativen Empfindlichkeit der Brechzahl werden die partiellen Ableitungen der Edlén-Formel für jede Umweltgröße gebildet. In der Tabelle 8.1 sind die daraus berechneten Werte dargestellt.

Tabelle 8.1: Einflüsse von Umweltgrößen auf die Luftbrechzahl  $n$

Relative Brechzahländerung	Einflussgröße	Änderung	resultierende Abweichung
$\frac{\Delta n}{n} = -0,929 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1} \Delta t$	$\Delta t$	$\pm 0,5 \text{ K}$	$\pm 0,46 \cdot 10^{-6}$
$\frac{\Delta n}{n} = +2,682 \cdot 10^{-7} \text{hPa}^{-1} \Delta p$	$\Delta p$	$\pm 1 \text{ hPa}$	$\pm 2,7 \cdot 10^{-7}$
$\frac{\Delta n}{n} = -1,14 \cdot 10^{-8} \Delta RH$	$\Delta RH$	$\pm 5\%$	$\pm 4 \cdot 10^{-8}$

Wie aus der Tabelle 8.1 zu erkennen ist, haben die Temperatur und der Luftdruck somit den praktisch größten Einfluss auf die Brechzahl. Um den Einfluss durch die Umweltbedingungen zu reduzieren, werden die Umweltparameter  $t$ ,  $p$  und  $RH$  während der Messung mit entsprechenden Sensoren gemessen. Die Messdaten werden anschließend in das MetroPro<sup>®</sup> Messprogramm eingegeben. Daraufhin wird die aktuelle Brechzahl bzw. Wellenlänge nach der Edlén-Formel im Zygo MetroPro<sup>®</sup> Messprogramm während der Topographiemessung in Echtzeit korrigiert.

Die Umweltparameter werden mit folgender Unsicherheit erfasst [57]:

- Lufttemperatur:  $\pm 0,1$  K
- Luftdruck:  $\pm 0,25$  hPa
- Relative Luftfeuchtigkeit:  $\pm 1$  %

Die Unsicherheit der Edlén-Formel  $U_E$  selbst wird dabei mit  $1 \cdot 10^{-8}$  bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit angegeben [6]. Aus diesen Werten wird die kombinierte Standardunsicherheit für die Bestimmung der Laserwellenlänge nach der Parametermethode mit folgender Gleichung berechnet.

$$U_\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial n} \cdot \frac{\partial n}{\partial t} \cdot u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial n} \cdot \frac{\partial n}{\partial p} \cdot u_p\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial n} \cdot \frac{\partial n}{\partial RH} \cdot u_{RH}\right)^2 + U_E^2} \quad (8.4)$$

Für optimale Laborbedingungen  $t = 20$  °C,  $p = 101325$  Pa,  $RH = 50$  % und  $\lambda = 632,8$  nm beträgt die kombinierte Unsicherheit der Laserwellenlängenbestimmung  $1,2 \cdot 10^{-7}$  nm.

#### 8.1.1.2 Messabweichung durch Totstrecke

Die Abstandsdifferenz zwischen dem optischen Gangunterschied Null und dem tatsächlichen Gangunterschied zwischen dem Mess- und Referenzstrahl eines Fizeau-Interferometers in der Nullposition beim Messvorgang wird als „Totstrecke“ bezeichnet, wie in Abbildung 8.2 dargestellt. Diese Differenz verursacht genau dann eine Messabweichung, wenn sich die Wellenlänge während des Messvorgangs ändert. Hinzukommen Abweichungseinflüsse aufgrund thermischer Längenänderungen bezüglich des Abstands zwischen der Referenzplatte und des Messspiegels.

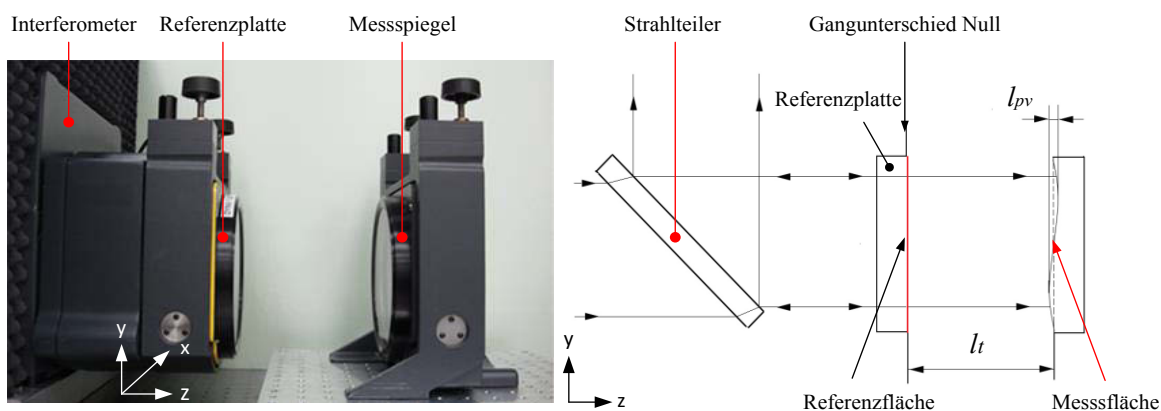


Abbildung 8.2: Fizeau-Interferometer mit einer „Totstrecke“

Bei einem Fizeau-Interferometer kann die Totstrecke leider nicht zu Null gebracht werden. Um diese Abweichung zu minimieren sollte der Platz zur Justage des Interferometers und zur Vermeidung von Berührungen zwischen der Referenzplatte und dem Messobjekt (z. B. Raumspiegelecke) so klein wie möglich ausfallen. Beim Zygo-GPI-Messsystem beträgt die Totstrecke mindestens 20 mm, wenn das Messobjekt mit einem selbstzentrierenden Drehhalter festgehalten wird. Dieser Wert muss bei der Anordnung des Interferometers berücksichtigt werden. Der Einfluss der Totstrecke kann mit der folgenden Gleichung ermittelt werden [87]:

$$\Delta l = \frac{(l_t + l_{PV})}{2} \cdot \Delta \lambda(t, p, RH) \quad (8.5)$$

Dabei gilt für den PV Wert des Messobjektes (Prüfling: Teilsegmente der x-Spiegelfläche einer NPM-200-Raumspiegelecke mit einer Ebenheitsabweichung  $< \lambda/4$ )  $l_{PV} = 150$  nm. Die Länge der Totstrecke  $l_t$  beträgt 20 mm. In diesem Fall ist die topographieabhängige Totstreckenabweichung im Vergleich zu der Abweichung, die durch die allgemeine Totstrecke bedingt ist, vernachlässigbar klein ( $l_t \gg l_{PV}$ ). Diese Totstrecke führt nach Gleichung (8.5) nur dann zu einem  $\Delta l > 0$ , wenn sich während der Messung die Wellenlänge, insbesondere durch die Änderung der Brechzahl ändert. Der Zusammenhang kann wiederum mit der Edlén-Formel (8.2) beschrieben werden. Um eine Messabweichung kleiner als 1 nm bei einer Totstreckenlänge von 20 mm zu erreichen, muss während der Topographiemessung die Temperaturänderung kleiner als 0,05 K, die Druckänderung kleiner als 18,64 Pa und die relative Feuchtigkeitsänderung kleiner als 3,8 % eingehalten werden. Durch eine gute Temperierung und durch eine möglichst kurze Messzeit (ca. 5 Minuten) für jede einzelne Topographiemessung wird versucht, diese Grenzwerte nicht zu überschreiten. Unter normalen Messbedingungen sind Druck und Luftfeuchtigkeit homogen und die Temperatur durch zeitliche und örtliche Veränderung inhomogen in der Messumgebung verteilt. Temperaturgradienten an der Referenzplatte und am Messobjekt führen zu Messabweichungen. Deswegen spielt der Temperatureinfluss die größte Rolle bei der Messabweichungsanalyse.

Um den Einfluss der Länge der Totstrecke auf das Ergebnis der Topographiemessung in der Praxis zu ermitteln, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Planspiegel mit einem Durchmesser von 25 mm und Ebenheitsabweichung  $< \lambda/2$  als Messobjekt in verschiedenen Totstreckenlängen ( $l_t = 20$  mm bis 300 mm mit einer definierten Schrittweite von 25 mm) unter den gleichen Umweltbedingungen gemessen. Die ermittelten PV-Werte bzw. RMS-Werte aus gemessenen Topographien des Planspiegels nach einer bestimmten Totstreckenlänge sind in Abbildung 8.3 dargestellt.

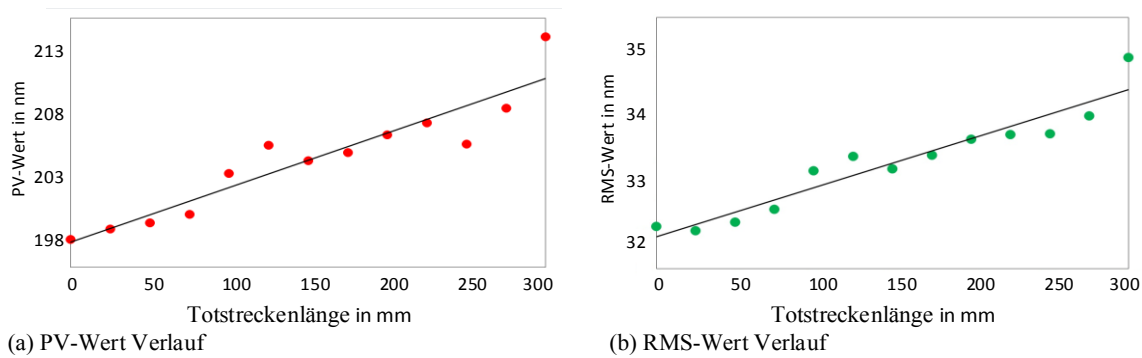


Abbildung 8.3: Verlauf der PV- bzw. RMS-Werte in Abhängigkeit der Länge der Totstrecke

In den beiden Diagrammen der Abbildung 8.3 ist zu erkennen, dass der PV- bzw. RMS-Wert durch die zunehmende Länge der Totstrecke proportional ansteigt. Um Messabweichungen durch die Totstrecke zu minimieren, sollte der Abstand zwischen Messobjekt und Referenzplatte möglichst klein sein.

## 8.1.2 Messabweichungen bedingt durch die Referenzplatte

### 8.1.2.1 Messabweichungen durch mechanische Belastungen

Im folgenden Abschnitt werden mögliche Abweichungsquellen analysiert, die aus der Formabweichung der Referenzplatte des Interferometers resultieren. Die Referenzplatte muss sich zur Topographiemessung einer stabilen, reproduzierbaren Lage befinden, um möglichst geringe Messunsicherheiten bei der Messung von Ebenheitsabweichungen mittels des Subapertur-Stitching-Interferometers zu erreichen. Die Konstruktion der Befestigung der Referenzplatte umfasst die Referenzplatte und eine Halterung mit Justageeinrichtung, wie in Abbildung 8.4a dargestellt.

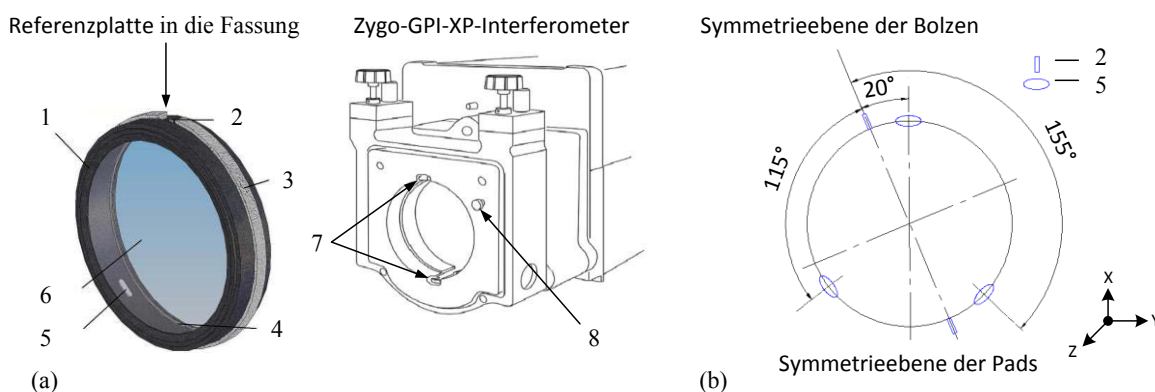


Abbildung 8.4: Befestigung der Referenzplatte am Interferometer (in Anlehnung an [5]): (a) 3D-Modell der Referenzplatte mit der Halterung, (b) Anordnung der Silikon-Klebepads und der Spannbolzen um die Referenzplatte mit den Symmetrieebenen (1 Spiegelfassung, 2 Stahl-Bolzen, 3 Halterung (abgebrochen dargestellt), 4 Federring, 5 Silikon-Klebepad, 6 Referenzplatte aus Quarzglas, 7 Bajonettverschlüsse (Klemmmechanismus der Halterung des Interferometers), 8 Feststellknopf)



Die Baueinheit Referenzplatte wird durch einen Bajonettverschluss mit zwei Stahlbolzen in der Halterung gefasst. Eine Spiegelfassung aus Aluminium trägt die Referenzplatte aus Quarz-Glas. Diese ist mit drei Silikon-Klebepads mit der Fassung verbunden, wie es Abbildung 8.4b zeigt.

Ein Klebepad befindet sich am oberen Ende der Platte und die beiden anderen Pads jeweils in einem Winkel von  $135^\circ$  gegen bzw. im Uhrzeigersinn dazu versetzt, was zu unterschiedlichen Verlagerungen an den Klebepads bzw. der Referenzplatte führt. Der Federring dient ausschließlich zur Fixierung der Referenzplatte im Fassungsring. Dabei wird die Referenzplatte sowohl in axialer als auch in radialer Richtung durch den Fassungsring in der Halterung gesichert und an beiden Bolzen gleichmäßig axial verspannt [5].

Die Spannkraft wird über den Feststellknopf an der Halterung aufgebracht. Durch diese Befestigung wird eine Spannung in der Referenzplatte verursacht. Die Spannungsverteilung im Inneren der Referenzplatte ist von der Platten-Befestigung abhängig, die durch die Umfangkraft am Feststellknopf beim Anziehen der Schrauben des Befestigungsmechanismus hervorgerufen wird [5]. Je fester die Fassung der Referenzplatte durch den Feststellknopf eingespannt ist, umso größer ist die Spannung auch an dem Feststellpunkten. Es wird angenommen, dass die maximal zulässige Umfangkraft am Feststellknopf 0,5 N beträgt. Um den Einfluss der Einspannung der Referenzplatte auf die Topographiemessung zu ermitteln, wurden zwei Untersuchungen zu unterschiedlichen Umfangkräften des Feststellknopfes zwischen Minimum (minimal zulässige Umfangkraft am Feststellknopf von 0,1 N als Sicherheitsmaßnahme gegen Erschütterungen der Referenzplatte während der Messung) und Maximum (maximal zulässige Umfangkraft am Feststellknopf von 0,5 N) durchgeführt. Die Messergebnisse der Topographiemessungen der in horizontaler Messrichtung untersuchten Testplatte (Referenzplatte C) sind in Abbildung 8.5a und b dargestellt.

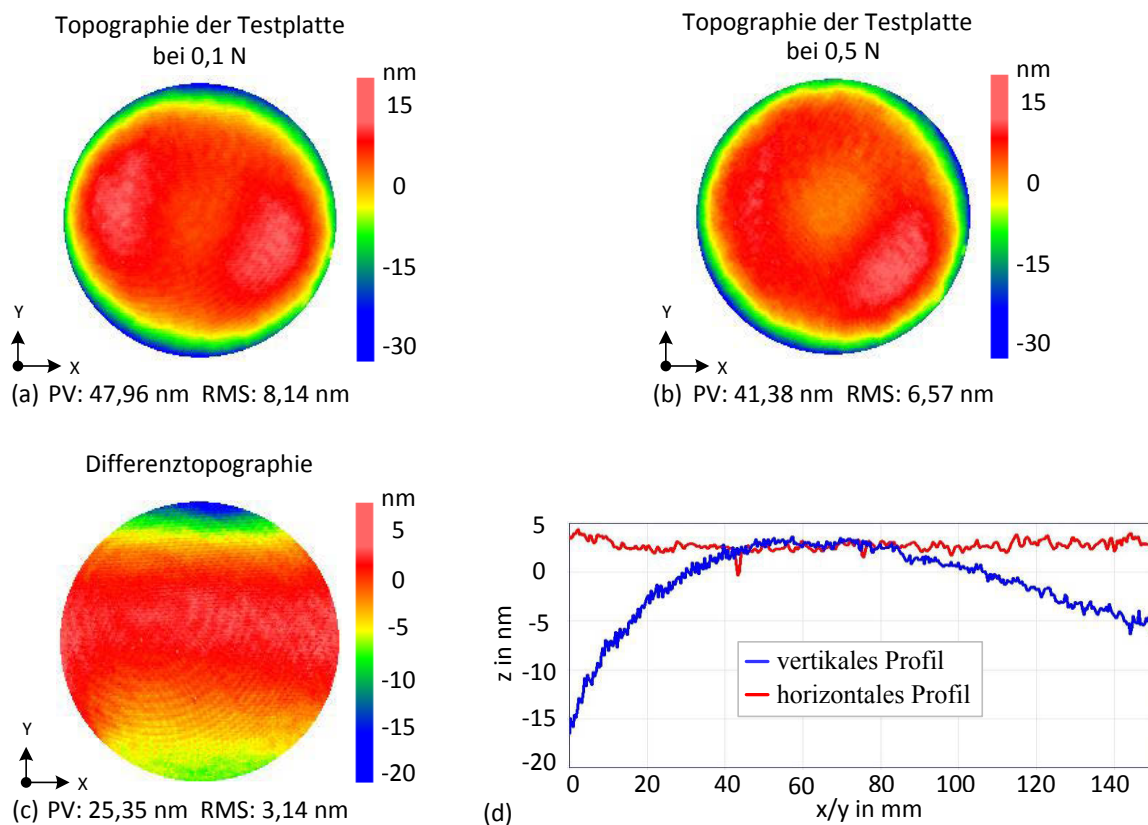


Abbildung 8.5: Messergebnisse zur Untersuchung der Wirkung der Einspannung der Referenzplatte auf die Topographiemessung im Abhängigkeit der Umfangkraft am Feststellknopf: (a) Gemessene Topographie des Messobjektes mit einer Umfangkraft von 0,1 N am Feststellknopf, (b) Gemessene Topographie des Messobjektes mit einer Umfangkraft von 0,5 N am Feststellknopf, (c) Differenz zwischen den beiden Ergebnissen, (d) Darstellung der Profileverläufe der Differenztopographie

Wie aus Abbildung 8.5c und d zu entnehmen ist, ergibt sich durch die geänderte Einspannkraft eine Änderung von 25,35 nm PV und ein RMS-Wert von 3,14 nm. In Abbildung 8.5d ist zu erkennen, dass der Horizontalprofilverlauf relativ stabil im Vergleich zum Vertikalprofilverlauf ist, der sehr starke Änderungen der Differenzwerte aufweist. Die stärkste Änderung im Vertikalprofilverlauf ist dabei vom oberen Rand der Platte zur Mitte hin zu sehen. Diese beträgt ca. 25 nm. Die stärkere Abweichung des Vertikalprofilverlaufs ist dadurch zu erklären, dass die Referenzplatte über die beiden Bajonettverschlüsse vertikal eingespannt ist (vgl. Abbildung 8.4a).

In [5] wurde die Abschätzung der daraus resultierenden Abweichung durch die aufbrachte Umfangkraft am Feststellknopf beim Anziehen der Schrauben des Befestigungsmechanismus mit Hilfe der FEM-Analyse untersucht. Die Ergebnisse der Simulation stimmen tendenziell mit den gemessenen PV- bzw. RMS-Werten überein. Die Ergebnisse dieser Analyse beweisen, dass die statischen Oberflächenkennwerte PV und RMS der Referenzplatte nahezu proportional mit der Umfangkraft ansteigen. Bereits ab

einer geringeren Umfangkraft von 0,126 N ist die Verformung der Referenzplatte im Messbereich von 150 mm Durchmesser signifikant und muss bei der Bestimmung der Unsicherheit der Topographiemessung beachtet werden [5].

Die mechanische Belastung entsteht vor allem durch die vertikale Einspannung der Referenzplatte mittels des Bajonettverschlusses. Um die Messabweichungen, verursacht durch mechanische Belastung, zu minimieren, sollte die Umfangkraft so gering wie möglich ( $< 0,126$  N) und bei allen Topographiemessungen möglichst gleich gehalten werden.

Wie bereits in Kapitel 3.4 erwähnt, wird für Topographiemessungen der z-Messspiegelfläche die Spiegelfassung von oben in die Einspannvorrichtung eingelegt. Damit wird die Referenzplatte nur von den drei Silikon-Klebepads mechanisch gehalten (vgl. Abbildung 3.16). Mit Hilfe der FEM-Simulation wurde festgestellt, dass bei hängender Halterung mittels Klemmmechanismus im Vergleich zu stehender Halterung keine nennenswerte zusätzliche Verformung der Referenzplatte auftritt [5]. In diesem Fall wirkt nur die Gravitation auf die Oberfläche der Referenzplatte in Richtung der negativen z-Achse des Messsystems. Die Beeinflussung der Gravitation auf die Oberfläche der Referenzplatte wurde schon im vorangegangenen Kapitel 3.4 ausführlich beschrieben. Außerdem wurde die Referenzplatte durch Drei-Platten-Tests zur flächenhaften Absolutprüfung in vertikaler Richtung präzise kalibriert.

#### **8.1.2.2 Messabweichungen durch thermische Belastungen**

Die Temperatur stellt insbesondere auf Grund ihrer inhomogenen Verteilung im Messsystem bzw. innerhalb der Referenzplatte einen kritischen Faktor dar. Die Variabilität der Temperatur ist eine Kombination aus zeitlicher und örtlicher Änderung. Temperaturschwankungen übertragen sich in Form von Längenausdehnungen auf die Topographien der Referenzplatte und des Messobjektes und können zu Messabweichungen führen [100].

Die Temperaturdifferenzen können zu einem Spannungsungleichgewicht führen, welches eine Deformation der Oberfläche bewirkt. Aus dem Interferenzbild zwischen den spiegelnden Belägen kann die Art der Verformung bestimmt werden. In Abbildung 8.6a ist ein Modellbeispiel dargestellt. Übertragen auf das Modell ist der Wärmestrom, der durch das Zygo-Interferometer erzeugt wird, die Warmluft. Dadurch kommt es zu den bereits beschriebenen Spannungsänderungen, was zu einer Durchbiegung der Referenzplatte führt.

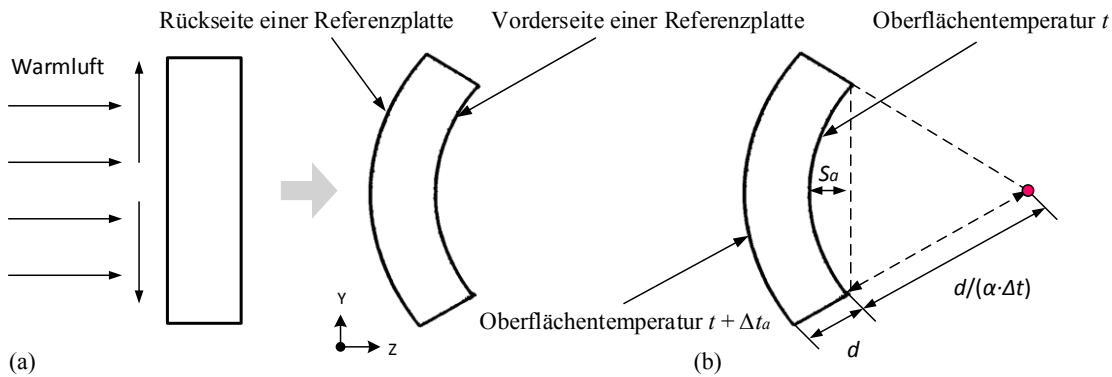


Abbildung 8.6: Messabweichung durch thermische Ausdehnung der Referenzplatte eines Fizeau-Interferometers: (a) Modell: Plattenverformung durch Warmluft (Wärmequelle: elektrische Bauteile des Interferometers), (b) Seitenprofil einer verbogenen Referenzplatte bei einem axialen Temperaturunterschied  $\Delta t_a$  ( $d$  ist Dicke der Platte,  $R$  der Radius bei  $\Delta t_a = 0$ ,  $d/(\alpha \cdot \Delta t_a)$  ist Krümmungsradius bei  $\Delta t_a \neq 0$ ) [39]

Die Verformung wird durch thermische Gradienten verursacht. Diese thermischen Gradienten können grundsätzlich jeglicher Art sein. Für die Untersuchungen sind aber nur Radial- und Axialgradienten von Bedeutung. Um eine Aussage über die Größenordnung der Verformung zu erhalten, lässt sich analog zu [39] eine radiale Krümmung  $S_r$  (Durchbiege-Effekt) entsprechend Gleichung (8.6) bestimmen.

$$S_r = \frac{d \cdot \alpha \cdot \Delta T_r}{2} \quad (8.6)$$

Wobei  $d$  die Dicke der Platte ( $d = 20$  mm) darstellt und  $\alpha$  der thermische Ausdehnungskoeffizient ist. Im Falle des verwendeten Qualitätsglases BK7 der von Zygo gelieferten Platten ( $\alpha = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ ) wurde berechnet, dass eine Temperaturdifferenz (Temperaturunterschied zwischen dem Zentrum und dem Rand der Vorderseite der Referenzplatte) von 0,01 K eine radiale Ausdehnung  $S_r$  von 1 nm bewirkt. Wenn es einen axialen Temperaturgradienten gibt, entsteht zwischen Rück- und Vorderseite der Referenzplatte ein Temperaturunterschied. Dieser bewirkt eine axiale Deformation  $S_a$  der Referenzplatte. Diese Deformation ist in Abbildung 8.6b dargestellt und wird über die Gleichung (8.7) beschrieben [39].

$$S_a = \frac{R^2 \cdot \alpha \cdot \Delta T_a}{2d} \quad (8.7)$$

$R$  kennzeichnet den Radius der Platte ( $R = 76,2$  mm). Für eine Temperaturdifferenz in axialer Richtung von 0,01 K entsteht bereits eine axiale Deformation  $S_a$  der Referenzplatte von ca. 12 nm. Somit überwiegt die Axialsenkung deutlich. Die beiden Deformationen sind zusammen für die Durchbiegung der Oberfläche der Referenzplatte verantwortlich.

Auch bei gut stabilisierten Umgebungszuständen sind bei kleinen Temperaturänderungen bereits merkliche Beeinflussungen des Messsystems möglich. Diese wirken sich auf die gesamte Genauigkeit der Messergebnisse der Topographiemessung aus.

Um eine genaue Aussage über den Einfluss der thermischen Belastung auf die Oberfläche der gefassten Referenzplatte (in ihrer gehaltenen Fassung) treffen zu können, wurde eine örtlich verteilte Temperaturmessung an der Referenzplatte mittels sechs gleichartigen Widerstandsthermometern vom Typ Pt100 durchgeführt (vgl. Abbildung 8.7a).

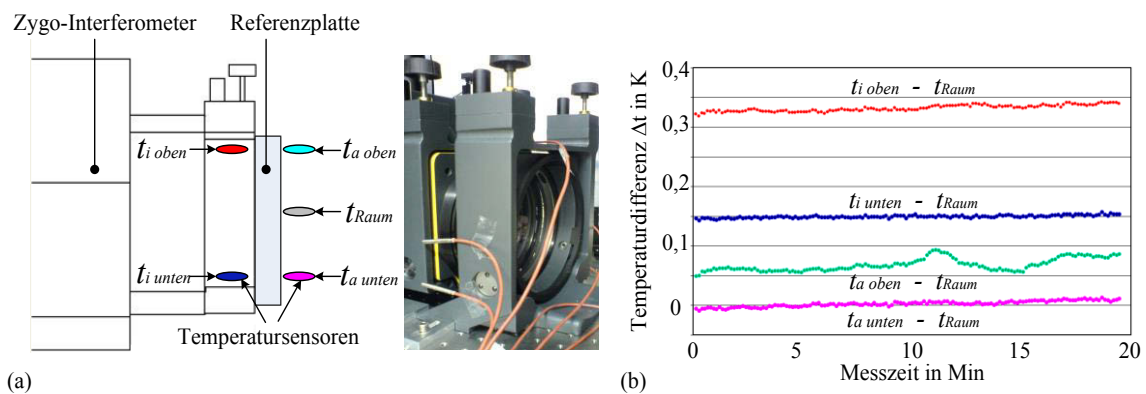


Abbildung 8.7: Temperaturuntersuchung der Referenzplatte des Zygo-Interferometers: (a) Anordnung der Temperatursensoren, (b) Temperaturdifferenzen zwischen Bezugstemperatur und Temperatur der Messstellen (Raumtemperatur  $t_{\text{Raum}}$  als Bezugstemperatur)

In Abbildung 8.7b sind die Temperaturdifferenzen unter Beachtung der unterschiedlichen Temperatur an der Referenzplatte dargestellt. Die Ergebnisse der Temperaturmessung zeigen unterschiedliche Temperaturen innerhalb ( $\Delta t_i = 0,2\text{ K}$ , Rückseite der Referenzplatte) und außerhalb ( $\Delta t_a = 0,05\text{ K}$ , Vorderseite der Referenzplatte) des Interferometers im Laufe einer Messdauer von 20 Minuten. Damit wurde nachgewiesen, dass das Zygo-Interferometer eine Wärmequelle darstellt, wie in Abbildung 8.6a gezeigt. Diese Werte wurden zur FEM-Simulation verwendet, um die maximale Deformation der Referenzplatte zu berechnen. Die resultierende maximale Deformation der Referenzplatte beträgt  $0,4\text{ nm}$  bei beidseitig unterschiedlichen Temperaturgradienten [5].

### 8.1.3 Messabweichungen bedingt durch das Subapertur-Stitching-Verfahren

#### 8.1.3.1 Statische Untersuchung

Bei der statischen Untersuchung wurden die Abweichungen des Stitching-Algorithmus ermittelt, indem zunächst die Topographie einer verspiegelten Testplatte aus Zerodur<sup>®</sup> im zentralen Bereich (Durchmesser  $\varnothing = 140\text{ mm}$ ) mit dem 6 Zoll Zygo-Interferometer vollflächig erfasst wurde (vgl. Abbildung 8.8a).

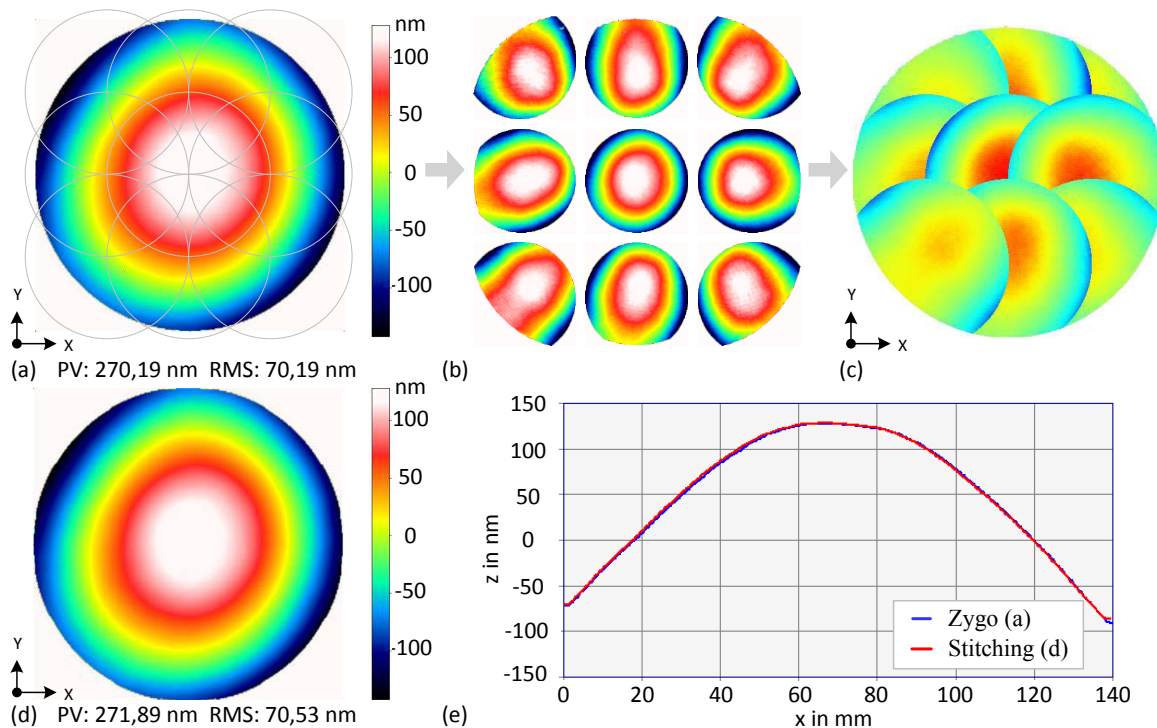


Abbildung 8.8: Prozess des Vergleichs und Messergebnisse: (a) erfasste Topographie (Gesamtapertur) einer in vertikaler Messrichtung untersuchten Testplatte mit Durchmesser von 140 mm, welche mit dem 6 Zoll (Durchmesser von ca. 150 mm) Zygo-GPI-Interferometer vollflächig gemessen wurde, (b) Darstellung der einzelnen Segmente, (c) Stitching-Regime mit 9 Aperturen (Ansicht aller Subaperturen), (d) Stitching-Ergebnis, (e) Horizontale Profilverläufe der beiden Messergebnisse ((a) und (d)) im Vergleich

Anschließend wurde die Topographie rechnerisch in neun Segmente (Durchmesser  $\varnothing = 80$  mm) mit 40 % Überlappung zerlegt und ein Stitching-Algorithmus angewandt (vgl. Abbildung 8.8b). Das Stitching-Regime ist in Abbildung 8.8c dargestellt. Bei diesem Beispiel werden neun Subaperturen für die gesamte Oberfläche der Testplatte zusammengesetzt. Das Stitching-Ergebnis ist in Abbildung 8.8d gezeigt. Die Differenz beider PV-Werte (vgl. Abbildung 8.8a und d) beträgt 1,7 nm bzw. bei den RMS-Werten 0,34 nm. In Abbildung 8.8e sind die Horizontalprofilverläufe der beiden Messergebnisse übereinandergelegt. Es lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Ergebnissen beobachten. Um die Unterschiede zu verdeutlichen, ist in Abbildung 8.9 die Differenz zwischen dem Stitching-Ergebnis (vgl. Abbildung 8.8d) und dem Ergebnis des Zygo-Interferometers (vgl. Abbildung 8.8a) sowohl als topographische Darstellung (2D-Darstellung) als auch Schnittdarstellung (horizontaler und vertikaler Profilverlauf) dargestellt.

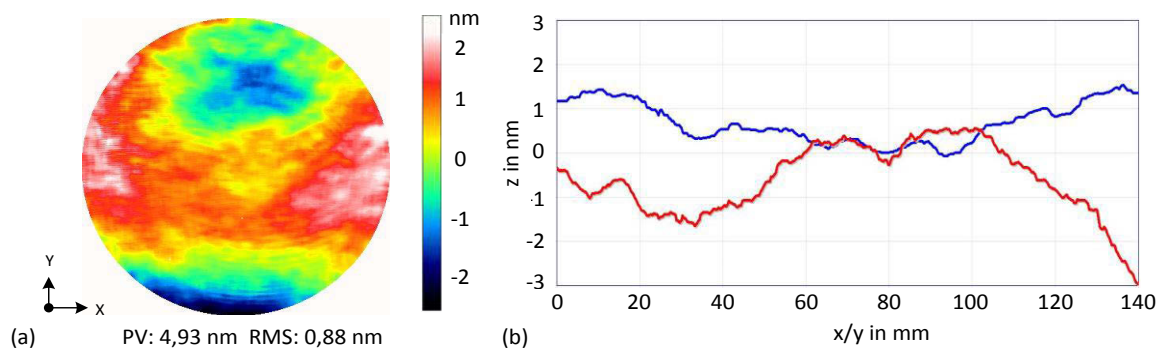


Abbildung 8.9: Darstellung der Differenz zwischen dem Stitching-Ergebnis (vgl. Abbildung 8.8d) und dem Ergebnis des Zygo-Interferometers (vgl. Abbildung 8.8a): (a) Differenz in 2D-Darstellung, (b) horizontaler und vertikaler Profilverlauf der Differenz

Durch das künstliche Partitionieren der bekannten Gesamtopographie in die Subaperturen verbleiben nur noch die Abweichungen, die durch den Stitching-Algorithmus selbst verursacht werden. Wie Abbildung 8.9a zeigt, befindet sich die maximale Abweichung der gemessenen und berechneten rekonstruierten Topographien im Randbereich der Testplatte. Die Differenz im zentralen Messbereich ( $\varnothing = 140$  mm) der Testplatte beträgt ca. 0,88 nm RMS und signalisiert damit eine sehr hohe Verlässlichkeit des Stitching-Algorithmus.

### 8.1.3.2 Dynamische Untersuchung

Im Vergleich zur statischen Untersuchung wurden bei der dynamischen Untersuchung, wie in Abbildung 8.10a und b zu sehen ist, neun versetzte Einzelmessungen (neun benachbarte Subaperturen) mit einem Durchmesser 75 mm (40 % Überlappungsbereich) durchgeführt. Für die Messungen wurde die Spiegelplatte zwischen den Einzelmessungen relativ zur Apertur des verwendeten Zygo-Interferometers jeweils so positioniert, dass am Ende des kompletten Messvorgangs der gesamte Messbereich in Form von sich überlappenden Teilmessbereichen erfasst ist. Dazu wurde ein hochpräziser XY-Verschietisch verwendet. Durch einen mäanderförmigen Verfahrensweg wurde die benötigte Messzeit und damit Veränderungen der Umgebungsbedingungen während der Messzeit minimiert. Anschließend wurde der Stitching-Algorithmus auf die neun realen Einzelmessungen angewandt (vgl. Abbildung 8.10c)



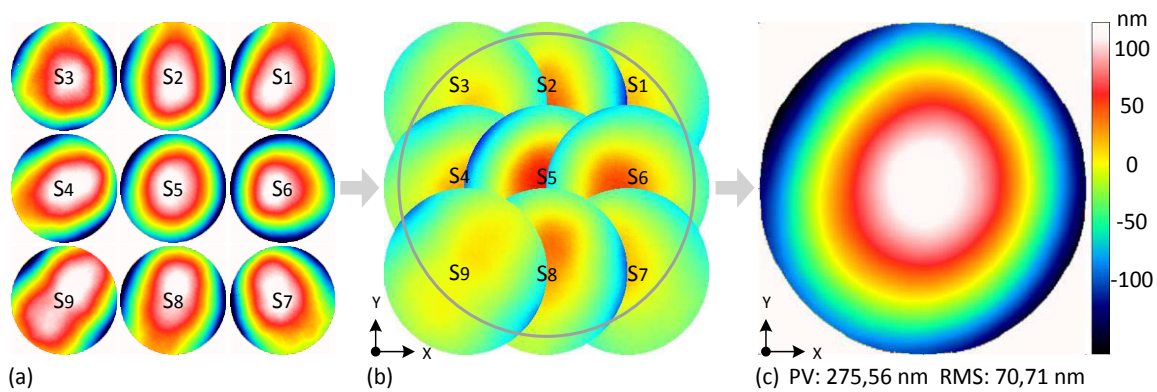


Abbildung 8.10: Abläufe des Subapertur-Stitching-Verfahrens zur Topographiemessung großer Testspiegel unter Verwendung der Stitching-Software „SmartStitching“ mit dem angewandten Stitching-Algorithmus (9 Einzelmessdaten werden im Stitching-Verfahren zusammengesetzt): (a) Darstellung der Einzelmessergebnisse des Subapertur-Stitching-Interferometers, (b) Verteilung der Subaperturen (Stitching-Regime mit 9 Aperturen  $S_1$  bis  $S_9$ ), (c) Stitching Ergebnis

Der Vergleichsbereich wurde durch eine kreisförmige Maske mit einem Durchmesser von 140 mm definiert. In der Regel weist der resultierende Datensatz einen Tilt (Verkippung) auf, der im Anschluss korrigiert werden (z. B. mittels Auswertesoftware MATLAB®) muss.

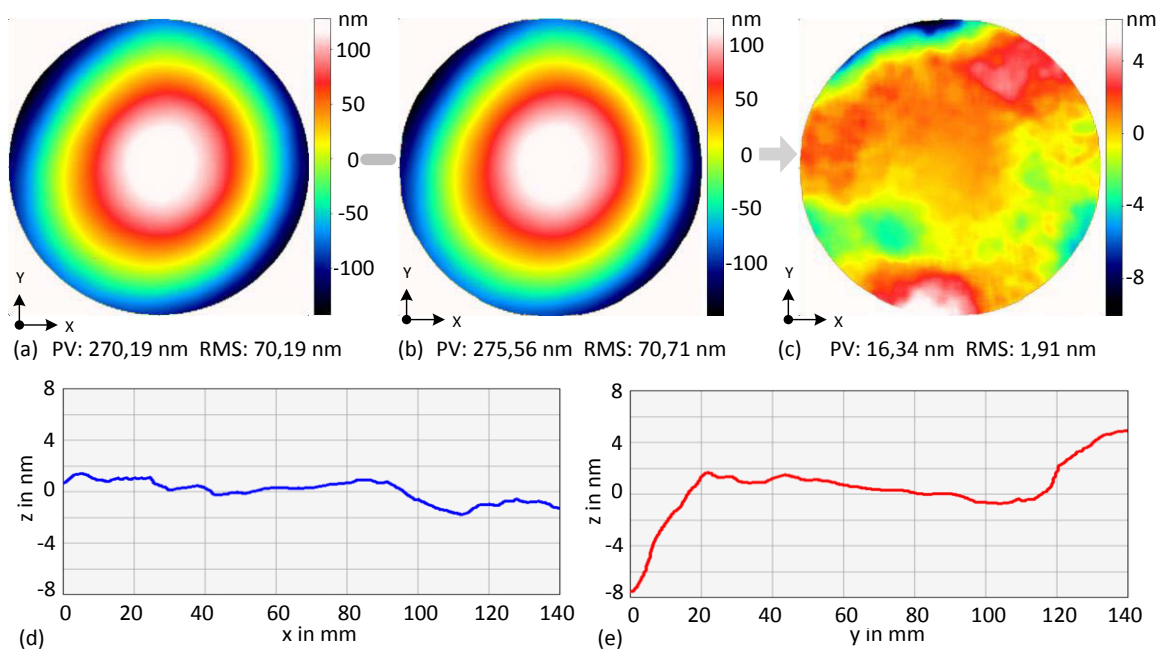


Abbildung 8.11: Vergleich der Messergebnisse bei der dynamischen Untersuchung: (a) erfasste Topographie (Gesamtapertur) einer in vertikaler Messrichtung untersuchten Testplatte mit Durchmesser von 140 mm, welche mit dem 6 Zoll (ca. Durchmesser von 152 mm) Zygo-GPI-Interferometer vollflächig gemessen wurde, (b) Ergebnis des Subapertur-Stitching-Interferometers unter Verwendung der Stitching-Software „SmartStitching“ mit dem angewandten Stitching-Algorithmus, (c) Differenz zwischen den beiden Ergebnissen, (d) horizontaler Profilverlauf der Differenz, (e) vertikaler Profilverlauf der Differenz



In Abbildung 8.11 ist sowohl die mit dem 6 Zoll Zygo-Interferometer gemessene Topographie, als auch die mit dem Subapertur-Stitching-Interferometer gemessene und rekonstruierte Topographie dargestellt. In Abbildung 8.11c ist schließlich die Topographiedifferenz dargestellt. Diese beträgt im Messbereich der Testplatte ca. 1,91 nm RMS. Dieser RMS ist damit in Relation zur statischen Untersuchung (0,88 nm RMS) mehr als doppelt so groß.

Diese Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Untersuchungen wurden im Wesentlichen durch folgende Umstände verursacht:

- Die Oberflächentopographie der Referenzplatte des Interferometers wurde vom Ergebnis abgezogen. Wenn Abweichungen beim absoluten Verfahren zur Kalibrierung der Referenzplatte auftreten, dann weist das einzelne Ergebnis der Subaperturen systematische Abweichungen auf.
- Die Messbedingungen während der Durchführung aller Teilmessungen sind nicht ideal konstant zu halten. Die einzelnen Subaperturen sind von zufälligem Rauschen, einer Temperaturdrift oder von Luftverwirbelungen überlagert. Deswegen ist die Wellenfront der benachbarten Subaperturen in den Überlappungsbereichen unterschiedlich.

In Abbildung 8.11e ist deutlicher als in der Abbildung 8.11d zu sehen, dass die Abweichung am Rand größer ist, als die in der Mitte des Profilverlaufs der Differenz. Der Grund dafür ist, dass das Messzeitintervall zwischen den Subaperturen  $S_2$  und  $S_8$  dreimal so lang ist, wie zwischen den Subaperturen  $S_3$  bis  $S_5$  (vgl. Abbildung 8.10a). Somit ist auch der Einfluss von Änderungen der Messbedingungen in der vertikalen Richtung deutlich größer. Trotzdem stimmt das Stitching-Ergebnis gut mit dem Ergebnis der Vollaperturmessung (Referenzmessung) überein.

Durch die dynamische Untersuchung wurde festgestellt, dass nur ein recht geringfügiger Unterschied zwischen dem topographischen Ergebnis der Vollaperturmessung, welche mit einem 6 Zoll Zygo-GPI-Interferometer vollflächig gemessen wurde, und dem Ergebnis des Subapertur-Stitching-Verfahrens zu erkennen ist. Somit beträgt die relative Messabweichung weniger als 2,7 % RMS (vgl. Abbildung 8.11). Diese Werte werden zur Bestimmung der Messunsicherheit der Topographiemessung mittels des Subapertur-Stitching-Verfahrens verwendet. Eine Untersuchung zur Vergleichbarkeit des Subapertur-Stitching-Verfahrens wurde bereits in Kapitel 5 ausführlich beschrieben. Die Formabweichung der gemittelten Topographie der Messspiegelfläche einer NPMM-200-Raumspiegelecke aus 10 Messungen unter Vergleichsbedingungen kann mit einer erweiterten Unsicherheit  $< 3,3$  nm PV ( $k = 2$ ) angegeben werden. Dieser Wert ist jedoch

wesentlich kleiner als die durch das Subapertur-Stitching-Verfahren resultierende Abweichung ( $< 15 \text{ nm PV}$ , vgl. Abbildung 8.11e). Aus diesem Grund wird die Unsicherheit der Topographiemessung nicht wie in Kapitel 5 durch die Standardabweichung bestimmt, sondern durch die Abweichung zwischen dem topographischen Ergebnis der Vollaperturmessung und dem Ergebnis des Subapertur-Stitching-Verfahrens.

### 8.1.3.3 Vergleich der Messergebnisse mit einer alternativen Messmethode

Um die Unsicherheit der Messung von Ebenheitsabweichungen mittels eines Subapertur-Stitching-Interferometers in dem Genauigkeitsrahmen weitgehend zu bestimmen, wurde eine Vergleichsmessung mit einem alternativen Messverfahren durchgeführt. Ein  $300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  Prüfspiegel (verspiegelt, Hersteller Carl Zeiss Jena) aus Zerodur<sup>®</sup> mit einer zertifizierten Formabweichung von  $\lambda/20$  (RMS-Oberflächengenauigkeit) mit einem zentralen Messbereich von  $250 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  wurde als Messprobe für die Vergleichsmessungen verwendet.

Die Vergleichsmessung wurde mit einem an der TU Ilmenau entwickelten interferometrischen Nanoprofilometer durchgeführt. Die grundsätzliche Funktionsweise und der Aufbau dieses Nanoprofilometers wurden in [62] ausführlich beschrieben. Wie in Abbildung 8.12 dargestellt, wurden die Prüfspiegel paarweise relativ zueinander mit dem Nanoprofilometer gemessen. Das Messprinzip und die Messprozedur gleichen dem klassischen Drei-Platten-Test-Verfahren, das bereits in Kapitel 2.2 und 3.3 erwähnt wurde. Aus diesen relativen Messungen wurde die Profilabweichung der zentralen  $250 \text{ mm}$  langen Profillinie dreier Prüfspiegel A, B, C durch Lösen eines linearen Gleichungssystems absolut bestimmt. Dabei wurden die vier notwendigen Profildifferenzen jeweils 10-mal gemessen und gemittelt. Die Standardunsicherheit der bestimmten Profilabweichungen betrug  $0,4 \text{ nm}$ . Unter Einhaltung der entsprechenden Messbedingungen der Horizontallage bei dem klassischen Drei-Platten-Test-Verfahren lassen sich mit dem Nanoprofilometer die Profilabweichungen von Prüfspiegeln mit einer erweiterten Unsicherheit von  $2,5 \text{ nm}$  ( $k = 2$ ) ermitteln [62].

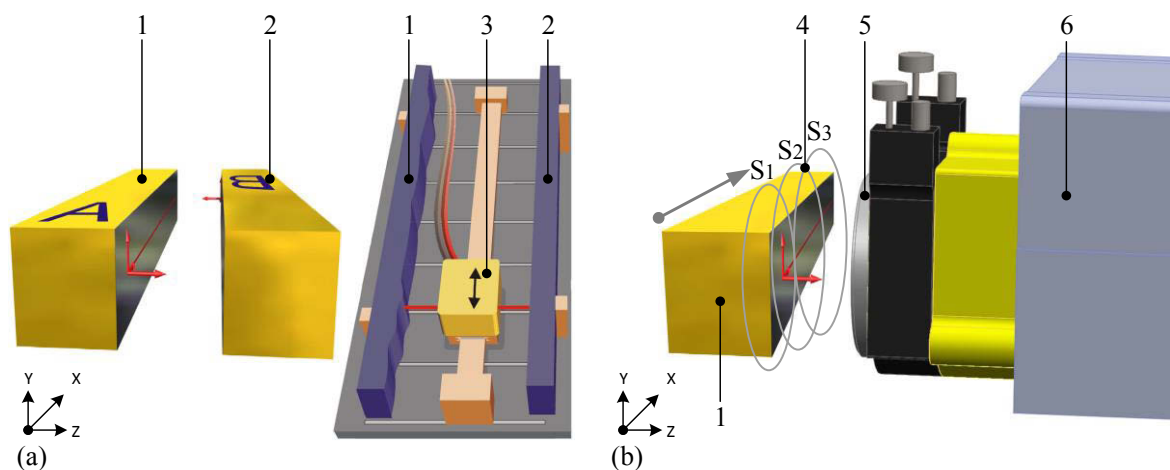


Abbildung 8.12: Messaufbau für die Vermessung an einem ebenen Prüfspiegel: (a) Messaufbau des interferometrischen Nanoprofilometers [62] (1 Prüfspiegel A, 2 Prüfspiegel B, 3 Interferometerkopf (linear verschiebbar)), (b) Messaufbau des Subapertur-Stitching-Interferometers (1 Prüfspiegel (linear verschiebbar), 4 Subaperturen  $S_1$  bis  $S_3$ , 5 Referenzplatte des Interferometers, 6 Zygo-Interferometer)

Der so gemessene Prüfspiegel wurde nun durch Subapertur-Stitching nochmals mit dem Zygo-Interferometer gemessen. Es waren jeweils drei versetzte Einzelmessungen (drei benachbarte Subaperturen  $S_1$  bis  $S_3$ ) nötig, um die gesamte Spiegeloberfläche von 250 mm x 20 mm mit 50 % Überlappungsbereich für das Stitchen zu messen. Dabei wurden die drei nötigen Einzelmessungen jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt. In Abbildung 8.13 sind sowohl Einzelergebnisse der drei Subtopographien als auch die Stitching-Ergebnisse ohne/mit Korrektur systematischer Abweichungen und die durch Stitching-Software „SmartStitching“ rekonstruierte gesamte Topographie des Prüfspiegels dargestellt. Wie in der Abbildung 8.13b und c zu erkennen ist, unterscheiden sich die Ergebnisse mit und ohne Korrektur der systematischen Abweichungen über den gesamten Messbereich um ca. 53,17 nm PV und 20,23 nm RMS.

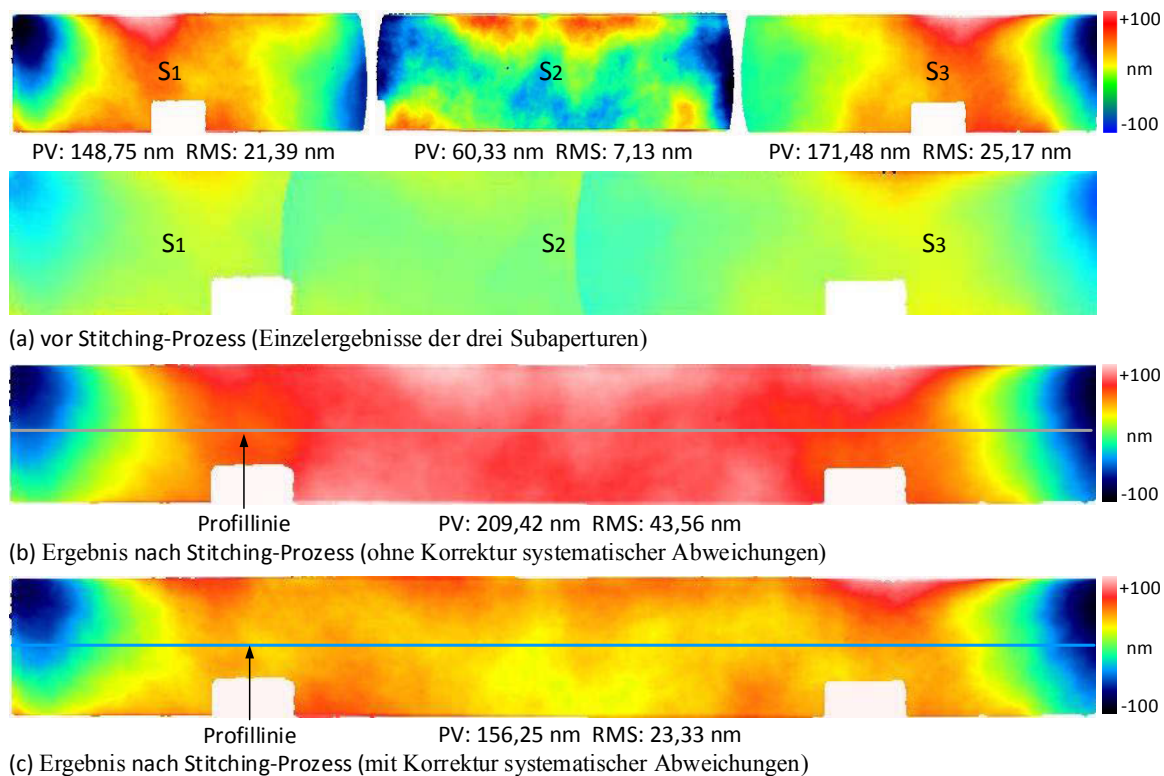


Abbildung 8.13: Stitching-Ergebnisse des flächig messenden Subapertur-Stitching-Interferometers

Das interferometrische Nanoprofilometer besticht durch seine Einfachheit im Aufbau. Allerdings ermöglicht es nur die präzise Messung der Profilabweichung des Prüfspiegels (Line-Scan-Verfahren). Um dennoch einen Vergleich beider Messverfahren zu ermöglichen, wird aus der flächenhaften Subaperturmessung jeweils eine Profillinie (vgl. Abbildung 8.13b und c) an der gleichen Stelle des Prüfspiegels, wie bei der Messung des interferometrischen Nanoprofilometers, extrahiert. Die resultierende Profillinie kann zwar direkt ausgewertet werden, aber diese Profillinie ist so noch nicht für den Vergleich der Messergebnisse geeignet. Die vom Subapertur-Stitching-Interferometer gemessene Topographie ist mit einem lateralen Messpunktabstand von  $360\text{ }\mu\text{m}$  aufgelöst. Die Messpunktedichte der vom Nanoprofilometer gemessenen Profillinie ist jedoch um ein Vielfaches größer ( $1\text{ }\mu\text{m}$  pro Pixel). Deswegen werden die Messpunktorte der niedriger aufgelösten Profillinie durch Interpolation entsprechend an die der höher aufgelösten Profillinie angepasst. Die Ergebnisse beider Messverfahren sind dann Messpunkt für Messpunkt mittels der Auswertsoftware SPIP<sup>®</sup> miteinander vergleichbar.

In Abbildung 8.14a sind sowohl die mit dem Nanoprofilometer gemessene Profillinie (Scanline), als auch die Profillinien (Schnitt durch mittlere Zeile) der in Abbildung 8.13c vorliegenden, rekonstruierten, topographischen Ergebnisse, die mit dem Subapertur-Stitching-Verfahren gemessen und nachberechnet wurden, übereinandergelegt dargestellt.

Abbildung 8.14b zeigt die Differenz zwischen beiden Messungen. Der Verlauf der Differenzkurve zwischen beiden Messungen hat eine Abweichung von 13 nm PV. Das Ergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung für die Messung des Normalspiegels insbesondere bei einer Korrektur der Formabweichungen der Referenzfläche des Subapertur-Stitching-Interferometers.

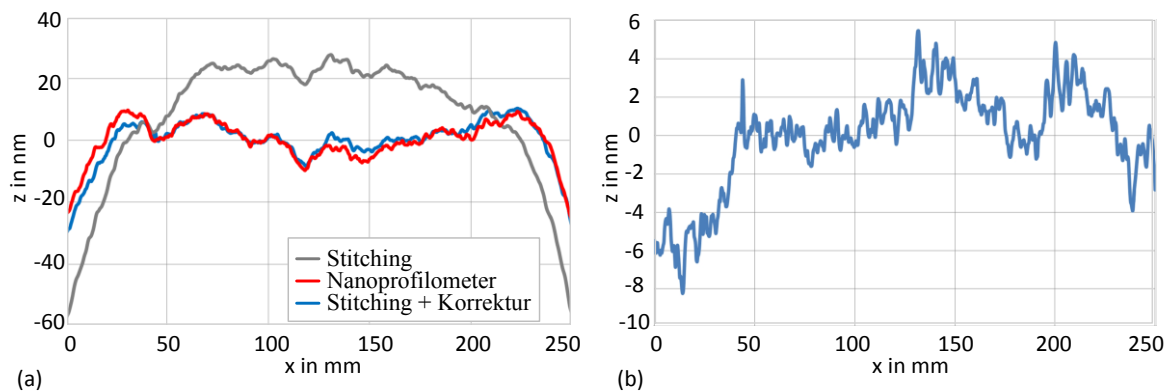


Abbildung 8.14: Vergleich der Messergebnisse des Prüfspiegels (a) Profillinien der in Abbildung 8.13b und c vorliegenden, rekonstruierten, topographischen Ergebnisse des flächig messenden Subapertur-Stitching-Interferometers (graue Kurve – ohne Korrektur systematischer Abweichungen, blaue Kurve – mit Korrektur systematischer Abweichungen) im Vergleich zu der mit dem Nanoprofilometer gemessenen Profilinie des Prüfspiegels (rote Kurve), (b) Differenz zwischen dem Messergebnis des Nanoprofilometers (blaue Kurve, vgl. Abbildung 8.14a) und dem Ergebnis mit Korrektur systematischer Abweichung des Subapertur-Stitching-Interferometers (rote Kurve, vgl. Abbildung 8.14a)

Mit den vorliegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei guten Umgebungsbedingungen und hoher Positioniergenauigkeit des Prüflings bei beiden Messverfahren (Stitching-Verfahren und Line-Scan-Verfahren) eine absolute Abweichung der Ergebnisse innerhalb von 13 nm PV ( $< \lambda/50$ ) möglich ist.

Wie sich aus den Ergebnissen der Abweichungsuntersuchung zum Subapertur-Stitching-Verfahren ergibt, ist der Einsatz des Subapertur-Stitching-Interferometers sehr zweckmäßig zur Messung der Topographie für sehr große Messbereiche, wobei Messauflösung und -genauigkeit vergleichbar mit denen einer klassischen Vollaperturmessung sind.

#### 8.1.4 Gesamte Messunsicherheit der Topographiemessung

Um die komplette Messunsicherheit des Prüfgerätes abschätzen zu können, wird ein Unsicherheitsbudget nach dem Standard-GUM-Verfahren [111, 112] erstellt. Wie in Tabelle 8.2 gezeigt, das die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten

Messabweichungsanalysen des Messsystems zur Topographiemessung einer NPMM-200-Raumspiegelecke zusammenfasst.

Tabelle 8.2: Unsicherheitsbudget des Messsystems zur Topographiemessung

Ursachen	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
Laserwellenlänge	$1,2 \cdot 10^{-7}$ nm	Rechteck	1	$u_\lambda = 1,2 \cdot 10^{-7}$ nm
Totstrecke	2 nm	Rechteck	1	$u_{tot} = 2$ nm
Deformation der Referenzplatte	0,4 nm	Rechteck	1	$u_{Ref} = 0,4$ nm
Subapertur-Stitching-Verfahren	15 nm	Rechteck	1	$u_{Sub} = 15$ nm
Kombinierte Standardunsicherheit ( $k = 2$ )				$u_c = 30,26$ nm

Nach GUM [112] ergibt sich aus allen vier Abweichungsquellen für jede einzelne Topographiemessung der Messspiegelflächen einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels Subapertur-Stitching-Verfahren eine erweiterte Messunsicherheit  $U$  von 30,26 nm ( $k = 2$ ).

## 8.2 Abweichungsanalyse des Messsystems zur Winkelmessung

### 8.2.1 Messabweichungen bedingt durch Führungsabweichungen des Mehrkoordinaten-Direktantriebssystems

Im folgenden Abschnitt werden mögliche Abweichungsquellen bei der Durchführung der Winkelmessung einer NPMM-200-Raumspiegelecke analysiert. Die wesentlichen Messabweichungen bei der Winkelmessung mittels zweier Pentaprismen und eines AKF werden durch Führungsabweichungen (Gier- und Rollfehler) des Mehrkoordinaten-Direktantriebssystems (MKDA), Pyramidalfehler der verwendeten optischen Bauteile bzw. der zu untersuchenden Raumspiegelecke und Kalibrierfehler der Pentaprismen verursacht. Wie bereits im Kapitel 7.2 dargestellt, können die Orthogonalitätsabweichungen der yz- bzw. xz-Spiegelflächen einer NPMM-200-Raumspiegelecke durch die Verschiebung des Pentaprismas 1 entlang des vom AKF ausgehenden Messstrahls bestimmt werden (vgl. Abbildung 7.5).

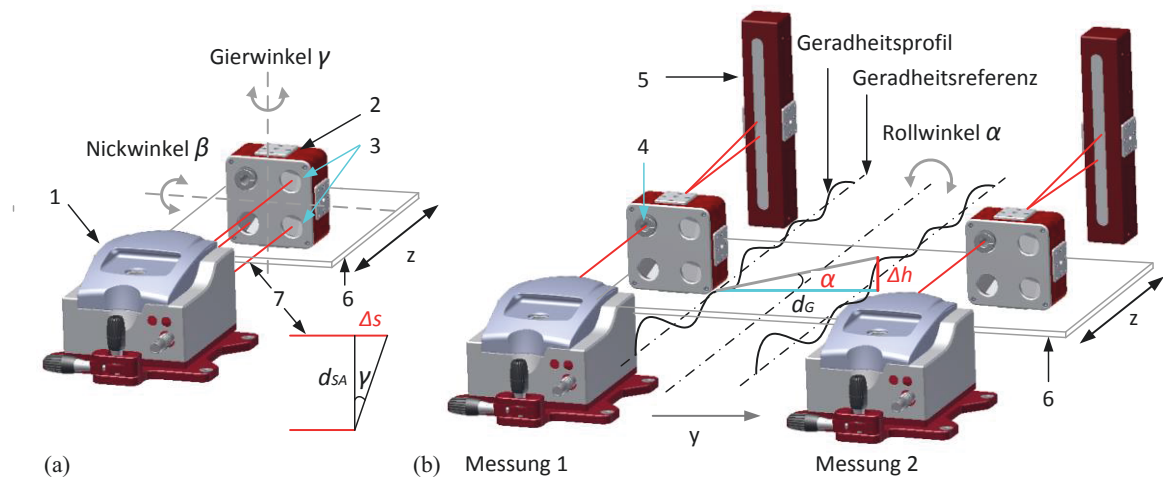


Abbildung 8.15: Messsystemaufbau zur Abweichungsmessung der Führung: (a) Nick- und Gierwinkelmessung mittels eines Dreistrahlinterferometers, (b) Bestimmung des Rollwinkels aus zwei parallelen Geradheitsmessungen (1 Sensorkopf mit Justiergelenk des Dreistrahl-Interferometers SP 15000 C5, 2 Reflektoreinheit, 3 Retroreflektoren (Tripelspiegel), 4 Wollaston-Prisma, 5 v-förmig angeordnete Geradheitsspiegel (Winkelreflektor), 6 Läufer des MKDA, 7 Messstrahl)

Durch Führungsabweichungen des MKDA kommt es während der Verschiebung des beweglichen Pentaprismas zu Abweichungen von dessen 90°-Ablenkwinkel. Diese werden als Abweichungseinflüsse wirksam. Aus diesem Grund ist eine genaue Quantifizierung und Untersuchung der Führungsabweichung des MKDA erforderlich, um zu analysieren, in welchem Maß die Messergebnisse dadurch beeinflusst werden. Zur Messung der Führungsabweichungen des MKDA wurde ein Mess- und Kalibrier-Interferometer SP 15000 C5 der Firma SIOS eingesetzt, wie in Abbildung 8.15 dargestellt. Das SP 15000 C5 ist ein Dreistrahl-Interferometer, welches mit Hilfe einer Reflektoreinheit zur Messung der z-Verschiebung und zur Ermittlung von Nick- und Gierwinkel verwendet werden kann (Abbildung 8.15a). Hierfür werden drei parallel angeordnete Messstrahlen verwendet, die je einem interferometrischen Längenmesskanal zugeordnet sind. Aus der Differenz jeweils zweier Längenwerte  $\Delta s$  und des konstanten Strahlabstands  $d_{SA}$  ( $d_{SA} = 50 \text{ mm}$ ) lässt sich der entsprechende Gier- und Nickwinkel gemäß Abbildung 8.15a nach Gleichung (8.8) hochgenau bestimmen.

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\Delta s_h}{d_{SA}}\right), \quad \beta = \arctan\left(\frac{\Delta s_v}{d_{SA}}\right) \quad (8.8)$$

Mit Hilfe eines Wollaston-Prismas und einem v-förmig angeordneten Geradheitsspiegel kann das Dreistrahl-Interferometer auch die Geradheit von Führungsbahnen an Maschinen sowie geradlinige Bewegungen von Maschinenteilen prüfen. Die grundsätzliche Funktionsweise des Dreistrahl-Interferometers SP 15000 C5 für die Geradheitsmessung ist

in [70] ausführlich beschrieben. Für die Bestimmung des Rollwinkels  $\alpha$  sind zwei um einen definierten Abstand  $d_G$  verschobene Geradheitsmessungen erforderlich (vgl. Abbildung 8.15b). In diesem Fall folgt der Rollwinkel  $\alpha$  aus den vertikalen Geradheitsabweichungen  $\Delta h$  und dem Abstand  $d_G$  der Bezugsgeraden [70]:

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta h}{d_G} \quad (8.9)$$

Wie aus Formel (8.9) ersichtlich, ist die Empfindlichkeit der Rollwinkelmessung vom Abstand zwischen den Bezugsgeraden abhängig. In diesem Fall beträgt er 300 mm. Es ergibt sich dadurch eine Winkelauflösung von 0,01" bei einer Auflösung der Geradheitsmessung von 10 nm. Für die Bestimmung des Rollwinkelfehlers wurden jeweils vier geforderte Positionen, wie bei der Messung der Orthogonalitätsabweichungen der yz- bzw. xz-Spiegelflächen einer NPM-200-Raumspiegelecke, entlang einer Führungsbahn des MKDA angefahren und Messdaten aufgezeichnet. Nach Durchführung einer Messreihe wurden alle Bestandteile des Kalibrier-Interferometers um 300 mm verschoben und anschließend alle Schritte wiederholt. Dabei wurden die vier nötigen Messungen für die jeweiligen Messpositionen jeweils zehnmal wiederholt und gemittelt.

Die Ergebnisse der Gier- und Rollwinkel des Läufers des MKDA sind in Tabelle 8.3 angegeben.

Tabelle 8.3: Gier- und Rollwinkel des Läufers an ausgewählten Positionen entlang der Messstrecke

Gierwinkel $\gamma_i$ in "			Rollwinkel $\alpha_i$ in "		
Pos. Nr.	Mittelwert in "	Std $\sigma$ in "	Pos. Nr.	Mittelwert in "	Std $\sigma$ in "
2	-0,01	0,05	2	0,05	0,15
1 <sub>1</sub>	-1,24	0,08	1 <sub>1</sub>	0,24	0,16
1 <sub>2</sub>	-1,87	0,07	1 <sub>2</sub>	0,09	0,13
1 <sub>3</sub>	-2,27	0,08	1 <sub>3</sub>	0,13	0,14

In diesem Fall entsprechen die Änderungen des Gierwinkels des Läufers des MKDA den Änderungen des Gierwinkels  $\Delta\gamma_{pp}$  des unteren Pentaprismas 1 während der Winkelmessung (Abbildung 7.5a). In gleicher Weise übertragen sich die Änderungen des Rollwinkels  $\Delta\alpha_{pp}$  des Läufers direkt auf die Änderungen des Rollwinkels des unteren Pentaprismas 1. Daraus ergibt sich eine maximale Rotation des Pentaprismas 1 im Rollwinkel  $\alpha_{pp}$  von  $\pm 0,19''$  ( $\pm 0,92 \mu\text{rad}$ ) bzw. im Gierwinkel  $\gamma_{pp}$  von  $\pm 2,26''$  ( $\pm 10,96 \mu\text{rad}$ ) während der Messung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den xz-Messspiegeln.



Die daraus resultierende Messabweichung kann mit Hilfe der durch die Roll- und Gierwinkel-Tests (vgl. Kapitel 6.3) ermittelten  $V(H)$ -Gleichungen bei der Messung der xz-Orthogonalitätsabweichung einer NPMM-200-Raumspiegelecke in Tabelle 8.4 genau bestimmt werden.

Tabelle 8.4: Ergebnisse des Roll- und Gierwinkel-Tests nach erfolgreicher Justage

	Funktion $V(H)$ in rad
Gierwinkel-Test	$V(H) = -1 \cdot 10^{-4}H - 5 \cdot 10^{-7}$
Rollwinkel-Test	$V(H) = 1,01H^2 + 8 \cdot 10^{-5}H - 1 \cdot 10^{-7}$

Somit ergeben sich Abweichungen im Vertikalmesswinkel  $V$  des AKF von  $\pm 0,51 \mu\text{rad}$  ( $\pm 0,11''$ ), die durch die Gierwinkeländerung  $\Delta\gamma_{pp}$  hervorgerufen worden sind. Durch die Rollwinkeländerung  $\Delta\alpha_{pp}$  resultieren ebenfalls Abweichungen im Vertikalmesswinkel  $V$ . Diese betragen  $\pm 0,1 \mu\text{rad}$  (ca.  $\pm 0,02''$ ). Damit wurde nachgewiesen, dass durch eine nahezu optimale Endjustage der Pentaprismen die von Gier- bzw. Rollwinkel des Pentaprismas abhängigen Abweichungen des tatsächlichen Messwertes minimiert werden konnten und somit Führungsabweichungen des MKDA kaum Einfluss auf die Messergebnisse haben.

### 8.2.2 Messabweichungen bedingt durch den Pyramidalfehler

In Abbildung 8.16 ist ein Halbwürfelprisma (Umlenkprisma) dargestellt, welches als  $90^\circ$ -Winkelnorm für die Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung zwischen der x- und y-Spiegelfläche einer NPMM-200-Raumspiegelecke dient. Hierbei bilden die beiden senkrecht aufeinander stehenden Flächen die Ein- und Austrittsflächen. Die dritte Fläche dient als Reflexion- bzw. Umlenkfläche. Idealerweise stehen alle Seitenflächen senkrecht auf der Grundfläche bzw. Deckfläche des Prismas (vgl. Abbildung 8.16). Wie bereits in Kapitel 7 erwähnt, besitzt in der Regel jedes Halbwürfelprisma nach der Herstellung einen Pyramidalfehler bzw. einen Rechtwinkligkeitsfehler. Der Pyramidalfehler ist, gemäß ISO 10110 für Prismen, die Abweichung vom  $90^\circ$ -Pyramidalwinkel. Der Pyramidalwinkel ist der Winkel zwischen der Bezugsfläche (Grundfläche des Pentaprismas) und der Seitenfläche des Pentaprismas. Das heißt, dass der Pyramidalfehler eine Abweichung vom rechten Winkel ist, der zwischen Bezugsfläche und Seitenfläche des Prismas liegt, wie in Abbildung 8.16 dargestellt.

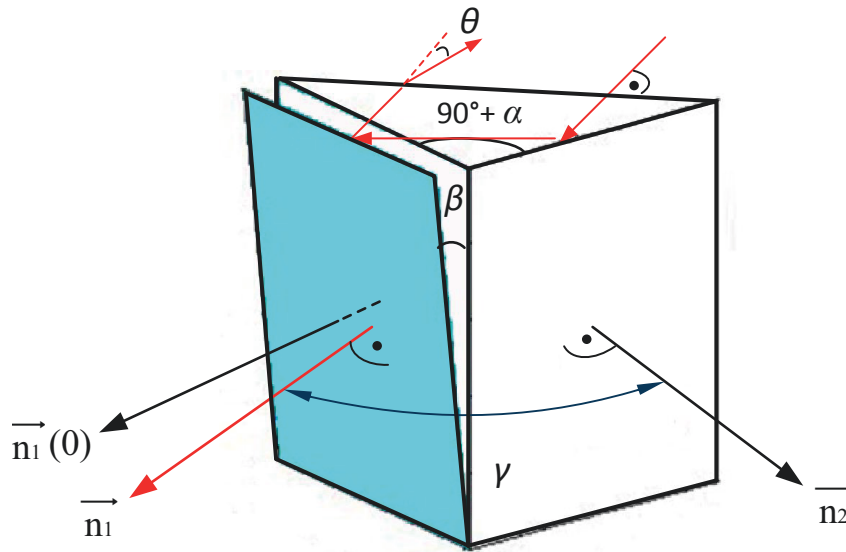


Abbildung 8.16: Prisma in realen Zustand mit Pyramidalfehler (blaue Ebene – Austrittsfläche des Prismas, weiße Ebene – Eintrittsfläche des Prismas)

Unter der vereinfachten Annahme, dass nur eine (hier blaue Ebene – Austrittsfläche des Prismas) von beiden Seitenflächen um die Grundfläche des Prismas verkippt wird, entsteht zwischen Bezugsfläche und Seitenfläche des Prismas ein Pyramidalfehler  $\beta$ . Der Ablenkungswinkel  $\gamma$  ist der Winkel zwischen der Richtung des Eintrittsstrahls und der Richtung des Austrittsstrahls. In diesem Fall ist der Ablenkungswinkel  $\gamma$  gleich dem Winkel zwischen den beiden Normalenvektoren der Seitenflächen des Prismas. Der Winkel zwischen den zwei Normalenvektoren  $\vec{n}_1$  und  $\vec{n}_2$  kann über folgende Formel unter Nutzung des Skalarproduktes berechnet werden.

$$\cos(\gamma) = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2|} \quad (8.10)$$

Die beiden Normalenvektoren  $\vec{n}_1$  und  $\vec{n}_2$  betragen entsprechend Abbildung 8.16:

$$\vec{n}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ \sin(\alpha) \\ \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad \vec{n}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8.11)$$

Dabei bezeichnet  $\alpha$  den Rechtwinkligkeitsfehler des Prismas und  $\beta$  den Pyramidalfehler des Prismas. Daraus lässt sich  $\gamma$  durch Gleichung (8.10) bestimmen.

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sin(\alpha)}{\sqrt{1 + \sin^2(\alpha) + \sin^2(\beta)}}\right) \quad (8.12)$$

Schließlich wird der Pyramidalablenkungsfehler wie folgt bestimmt:  $\theta = \gamma - \pi/2$ . Die Tabelle 8.5 zeigt den Einfluss des Pyramidalablenkungsfehlers  $\theta$  in Abhängigkeit vom Pyramidalfehler  $\beta$  und dem Rechtwinkligkeitsfehler des Prismas  $\alpha$ . Es wird dargestellt, ab welcher Höhe des Pyramidalfehlers  $\beta$  das Messergebnis der Winkelmessung um maximal 0,01" (Pyramidalablenkungsfehler  $\theta$ ) abweicht.

Tabelle 8.5: Einfluss des Pyramidalablenkungsfehlers  $\theta$  in Abhängigkeit von dem Pyramidalfehler  $\beta$  und dem Rechtwinkligkeitsfehler des Prismas  $\alpha$

Pyramidalablenkungsfehler $\theta$	Rechtwinkligkeitsfehler $\alpha$	Pyramidalfehler $\beta$
0,01"	1"	8°
0,01"	5"	4°
0,01"	10"	3°

In der Tabelle 8.5 wird veranschaulicht, dass der Pyramidalfehler kaum Einfluss auf das Ergebnis der Winkelmessung hat und daher vernachlässigt werden kann.

### 8.2.3 Messabweichung bedingt durch den Kalibrierabweichungen der Pentaprismen

Um die Unsicherheit der Kalibrierung von Pentaprismen mittels des Drei-Pentaprismen-Tests in dem Genauigkeitsrahmen umfassend zu bestimmen, wurde eine Vergleichsmessung mit einem am NIST (*National Institute of Standards and Technology*) vorgeschlagenen alternativen Messverfahren zur horizontalen Kalibrierung von Pentaprismen nach [71] mit Hilfe von zwei zueinander fluchtend angeordneten AKF und zwei parallel zueinander stehenden Spiegeln durchgeführt (vgl. Abbildung 8.17a).

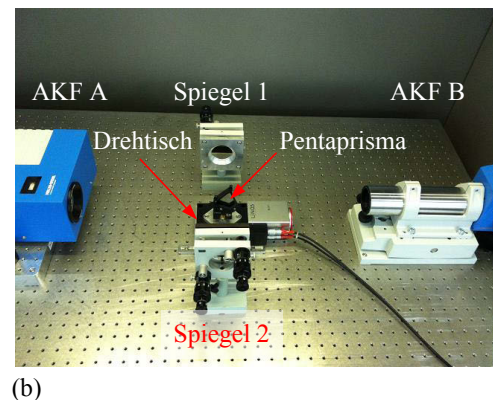
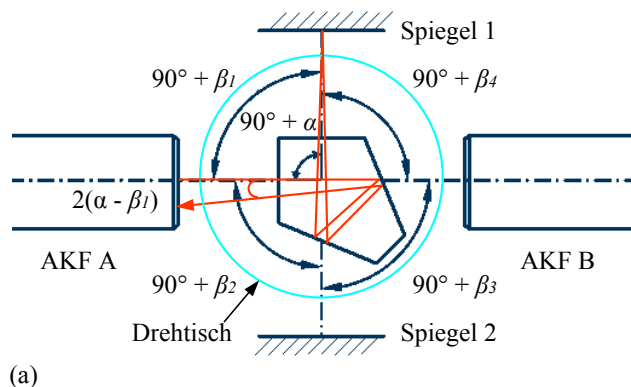


Abbildung 8.17: (a) Schematische Darstellung des Messprinzips vom NIST zur Kalibrierung eines Pentaprismas [71], (b) Foto des Messaufbaus

Das Messprinzip besteht darin, dass das zu untersuchende Pentaprisma mit Hilfe eines zusätzlichen Spiegels nacheinander gegen zwei AKF, die genau in Flucht sind, in verschiedenen Orientierungen verglichen wird. Durch verschiedene Messungen kann ein Gleichungssystem aufgestellt werden, um den abweichungsbehafteten Winkel des Pentaprismas  $\alpha$  zu berechnen. Die einzelnen Schritte des Justageprozesses und deren Reihenfolge sind in [71] ausführlich beschrieben. Zunächst wird das Pentaprisma mit dieser Anordnung in vier Positionen gemessen. Dabei werden die Winkel zwischen den Autokollimatoren und den Spiegeln mit  $90^\circ + \beta_1$ ,  $90^\circ + \beta_2$ ,  $90^\circ + \beta_3$  und  $90^\circ + \beta_4$  bezeichnet, wie in Abbildung 8.17a dargestellt. Wird eine Winkelabweichung zwischen dem Ein- und Austrittsstrahl des zu untersuchenden Pentaprismas  $\alpha$  angenommen, so ist der Winkel zwischen Ein- und Austrittsstrahl gleich  $2(\alpha - \beta_i)$ . Anhand der aufgezeichneten Messwerte lässt sich die exakte Winkelabweichung des Pentaprismas berechnen. Die vier abgelesene Messwerte der AKF  $\gamma_i$  werden im Folgenden dargestellt:

$$\begin{aligned}
 \gamma_{A1} &= \Delta_A - (\alpha - \beta_1) \\
 \gamma_{A2} &= \Delta_A + (\alpha - \beta_2) \\
 \gamma_{B1} &= \Delta_B - (\alpha - \beta_3) \\
 \gamma_{B2} &= \Delta_B + (\alpha - \beta_4)
 \end{aligned} \tag{8.13}$$

Die Werte  $\Delta_A$  und  $\Delta_B$  werden als Offsetwerte der jeweiligen AKF betrachtet. Das Gleichungssystem (8.13) kann unter der Voraussetzung gelöst werden, dass die Summe aller Winkel genau  $360^\circ$  betragen muss. Somit ergibt sich für die Winkelabweichung des Pentaprismas  $\alpha$  auf Basis des arithmetischen Mittelwertes.

$$\alpha = \frac{1}{4} \cdot (-\gamma_{A1} + \gamma_{A2} - \gamma_{B2} + \gamma_{B1}) \tag{8.14}$$

In Kapitel 6.2 wurde diese Winkelabweichung  $\alpha$  zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangsstrahl mit dem Drei-Pentaprismen-Test gemessen. In der folgenden Tabelle sind die Messdaten der beiden Messmethoden gegenübergestellt.

Tabelle 8.6: Vergleichstabelle der Ergebnisse der horizontalen Kalibrierung der Pentaprismen

NIST Methode			Drei-Pentaprismen-Test		
Nr.	Mittelwert	Messunsicherheit ( $k = 2$ )	Nr.	Mittelwert	Messunsicherheit ( $k = 2$ )
1	-1,23"	0,01"	1	-1,32"	0,05"
2	-13,29"	0,02"	2	-13,31"	0,04"

Die mittlere Abweichung aus Tabelle 8.6 zwischen den Messergebnissen beträgt 0,06". Damit konnte gezeigt werden, dass bei guten Umgebungsbedingungen und hoher Positioniergenauigkeit des zu untersuchenden Pentaprismas bei beiden Messverfahren (NIST-Verfahren und Drei-Pentaprismen-Test-Verfahren) sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse ergibt. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass das Drei-Pentaprismen-Test-Verfahren eine sehr hohe Zuverlässigkeit besitzt.

#### 8.2.4 Gesamte Messunsicherheit der Winkelmessung

Um die komplette Messunsicherheit des Prüfgerätes abschätzen zu können, wird ein Unsicherheitsbudget nach dem Standard-GUM-Verfahren [111, 112] erstellt, das die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Messabweichungsanalysen des Messsystems zur Winkelmessung einer NPMM-200-Raumspiegelecke zusammenfasst.

Tabelle 8.7: Unsicherheitsbudget des Messsystems zur Winkelmessung

Ursachen	Standardunsicherheit $u(x_i)$	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicherheitsbeitrag $u(y)$
Führungsabweichungen des MKDA	0,11"	Rechteck	1	$u_{MKDA} = 0,11"$
Pyramidalfehler	0,01"	Rechteck	1	$u_{pf} = 0,01"$
Kalibrierabweichungen der Pentaprismen	0,06"	Rechteck	1	$u_{ka} = 0,06"$
AKF (ELCOMAT 3000)	0,02"	Rechteck	1	$u_{AKF} = 0,02"$
Kombinierte Standardunsicherheit ( $k = 2$ )				$u_c = 0,26"$

Aus der Abweichungsanalyse des Messsystems zur Winkelmessung einer NPMM-200-Raumspiegelecke ist deutlich zu erkennen, dass die größte Messunsicherheit durch die Kalibrierabweichungen der Pentaprismen verursacht wurde. Nach GUM [112] ergibt sich aus allen vier Abweichungsquellen für jede einzelne Winkelmessung zwischen den

Messspiegelflächen einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels zweier Pentaprismen und eines AKF eine erweiterte Messunsicherheit  $U$  von  $0,26''$  ( $k = 2$ ).

## 8.3 Kapitelzusammenfassung

Im Kapitel 8 wurden mögliche Abweichungen des Messsystems zur Bestimmung der Formabweichungen einer NPMM-200-Raumspiegelecke analysiert. Des Weiteren wurden die Auswirkungen der Einflüsse einzelner Abweichungsquellen auf die Messergebnisse untersucht. Nach GUM ergibt sich aus allen vier Fehlerquellen für jede einzelne Topographiemessung der Messspiegelflächen einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels Subapertur-Stitching-Verfahren eine erweiterte Messunsicherheit von  $30,26 \text{ nm}$  ( $k = 2$ ). Die erweiterte Messunsicherheit für jede einzelne Winkelmessung zwischen den Messspiegelflächen einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels zweier Pentaprismen und eines AKF beträgt  $0,26''$  ( $k = 2$ ).

## 9 Zusammenfassung

Die Motivation für die vorliegende Arbeit bestand darin, ein hochauflösendes Messsystem zu entwickeln, das zur hochpräzisen Bestimmung der Formabweichungen aller drei Messflächen einer Raumspiegelecke und der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Messspiegeln im montierten Zustand angewendet werden kann. Mit Hilfe dieser Mess- und Korrekturverfahren soll künftig auch der Einsatz kostengünstigerer Raumspiegelecken in NPM-Maschinen ermöglicht werden, welche mit größeren Toleranzen spezifiziert und mit größeren Fertigungsabweichungen hergestellt werden können.

Nach einer Einführung in das Problem der Topographiemessung einer Raumspiegelecke im montierten Zustand und einem umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Technik werden in dieser Arbeit die Grundlagen der Absolutverfahren zur Kalibrierung des Referenzspiegels in horizontaler und vertikaler Messrichtung und der Subapertur-Stitching-Verfahren behandelt. Zunächst wurde im Kapitel 3 das Funktionsprinzip und der Messaufbau für die Topographiemessung sowohl der Raumspiegelecke der NMM-1 als auch der großen Raumspiegelecke der NPMM-200 dargestellt.

Im nachfolgenden Kapitel 4 wurde das eingesetzte Messsystem zur hochpräzisen Topographieuntersuchung der x-, y- und z-Spiegelflächen der NMM-1-Raumspiegelecke beschrieben. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass die Verformung der z-Messspiegelfläche der alten Spiegeleckenbauform im Vergleich zu den x- und y-Messspiegelflächen deutlich von den Lagerbedingungen abhängt. Durch die Untersuchung von Kriechvorgängen bei unterschiedlicher Belastung wurde festgestellt, dass das Kriechverhalten der Raumspiegelecke nach einer Zeitspanne von 6 Stunden vernachlässigbar ist und keiner gesonderten Behandlung bedarf.

In Kapitel 5 ist der Messprozesses mittels Stitching-Verfahren für Topographiemessungen einer NPMM-200-Raumspiegelecke beschrieben. Nach zahlreichen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die Verformungen der Messspiegelfläche des z-Spiegels ausschließlich durch das wirkende Eigengewicht entstehen. Die Formabweichung der gemittelten z-

Topographie beträgt dabei 199,76 nm ( $< \lambda/3$ ) PV und kann mit einer erweiterten Unsicherheit  $U$  von 3,32 nm ( $k=2$ ) angegeben werden. Anschließend werden die Topographien der Messspiegelflächen der NPMM-200-Raumspiegelecke als Korrekturmatrizen für die Echtzeitkorrektur in der NPMM-200 verwendet.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Bestimmung der Abweichung der Orthogonalität zwischen den Spiegeln (xy-, xz- und yz-Spiegel) der Raumspiegelecke. Das neue Konzept der Messung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Spiegeln einer NMM-1-Raumspiegelecke mit Hilfe von hochpräzisen AKF und zwei Pentaprismen wurde in Kapitel 6 vorgestellt. Das Messverfahren ist im Vergleich zu anderen Verfahren besonders geeignet für die Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen der xz- und yz-Spiegel im montierten Zustand (nahezu wie eingebauter Zustand in NPM-Maschine). Da bei diesem Verfahren die Winkelabweichungen der verwendeten Pentaprismen direkt in das Gesamtmessergebnis eingehen, wurden diese durch eine absolute Kalibrierung mittels eines Fizeau-Interferometers ermittelt und später zur Korrektur verwendet, um die systematischen Abweichungen zu beseitigen. Außerdem wurden in diesem Kapitel die Justageprozeduren und zugehörige Parameter der Pentaprismen dargestellt. Damit werden die möglichen Messabweichungen bei der Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung der Spiegelflächen minimiert und es wurde insgesamt eine geringere Messunsicherheit erreicht. Die ermittelten Messwerte der Orthogonalitätsabweichungen ( $\beta_{xy}$ ,  $\beta_{xz}$ ,  $\beta_{yz}$ ) zwischen den Messspiegeln liegen unter  $2'' \pm 0,02''$  ( $k=2$ ).

Aufgrund des begrenzten Tubusdurchmessers des AKF (Messbereich  $\varnothing = 50$  mm) wurde ein modifiziertes System zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Messspiegeln einer NPMM-200 Raumspiegelecke eingesetzt, um die Spiegelflächen der Raumspiegelecke während einer Winkelmessung vollständig erfasst werden können. Dies ist Inhalt des 7. Kapitels. Im Unterschied zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen einer NMM-1 Raumspiegelecke dient hier ein rechtwinkliges Halbwürfelpisma als Kalibriernormal. Dessen Winkelabweichung wurde mit einem Fizeau-Interferometer hochpräzise kalibriert. Der gesamte Messvorgang wurde in Einzelmessungen zwischen den  $X_i$ - und  $Y_i$ - Teilsegmenten des x- und y-Spiegels aufgeteilt. Am Ende des kompletten Messvorgangs wurden die einzelnen Orthogonalitätsabweichungen zwischen den x- und y-Teilsegmenten vollständig ermittelt. Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der x-, y-Spiegelflächen der NPMM-200-Raumspiegelecke beträgt  $-0,98'' \pm 0,02''$  ( $k=2$ ).

Zur Messung der yz- bzw. xz-Orthogonalitätsabweichung der Raumspiegelecke wurde ein absolutes Messverfahren eingesetzt, wie bereits bei der Messung der yz- bzw. xz-Orthogonalitätsabweichung einer NMM-1 Raumspiegelecke. Da verfahrensbedingt die



Winkelabweichungen der verwendeten Pentaprismen direkt in das Gesamtmessergebnis eingehen würden, wurden diese bei der Berechnung der Orthogonalitätsabweichungen der Raumspiegelflächen entsprechend wieder herausgerechnet. Es wurden mit diesem Verfahren die Orthogonalitätsabweichungen zwischen der y- und z-Spiegelfläche bzw. zwischen der x- und z-Spiegelfläche ermittelt. Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der y-, z-Spiegelflächen beträgt  $3,46'' \pm 0,03''$  ( $k = 2$ ). Die Orthogonalitätsabweichung zwischen den Bezugsebenen der x-, z-Spiegelflächen beträgt  $2,31'' \pm 0,03''$  ( $k = 2$ ).

Kapitel 8 setzt sich thematisch mit einer Analyse der Messabweichungen auseinander. Umwelteinflüsse sowie Messabweichungen des Messsystems stellen sowohl bei interferometrischen Messungen im Nanometerbereich als auch bei hochpräzisen Winkelmessungen sehr große Störfaktoren dar. Nach GUM ergibt sich aus allen vier Fehlerquellen für jede einzelne Topographiemessung der Messspiegelflächen einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels Subapertur-Stitching-Verfahren eine erweiterte Unsicherheit von  $30,26 \text{ nm}$  ( $k = 2$ ). Die Gesamtunsicherheit für jede einzelne Winkelmessung zwischen den Messspiegelflächen einer NPMM-200-Raumspiegelecke mittels zweier Pentaprismen und eines AKF beträgt  $0,26''$  ( $k = 2$ ).

Die in dieser Arbeit gewonnen Ergebnisse tragen zur technischen Weiterentwicklung der NPM-Maschinen bei, die höchsten Ansprüchen an die Messunsicherheit der NPM-Maschinen gerecht werden sollen. Aus den Topographiedaten der Messspiegelflächen und den Messwerten der drei Orthogonalitätsabweichungen zwischen den Bezugsebenen der Messspiegelflächen wurden die Koeffizienten der Korrekturfunktionen berechnet, um die Online-Korrektur von Formabweichungen der Raumspiegelecke in der NPM-Maschine zu ermöglichen.

# Anhang A: Topographische Korrekturdaten einer NMM-1-Raumspiegelecke

x-Messspiegelfläche der NMM-1-Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln (Korrekturpolynomfunktion 3. Ordnung)

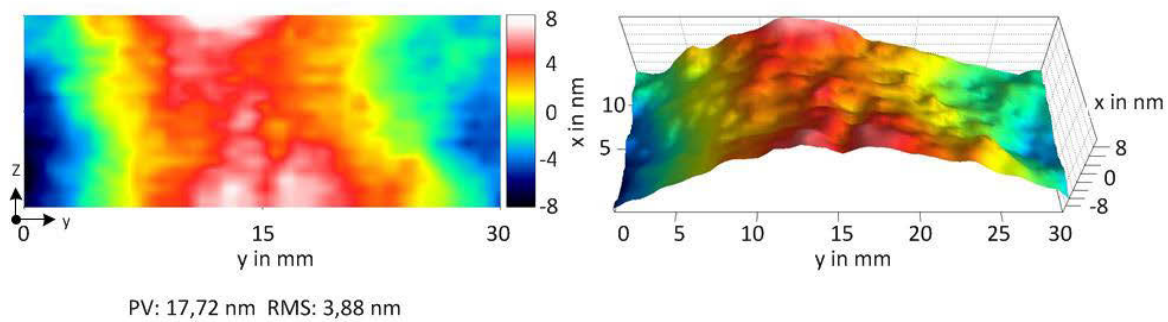


Abbildung A.1: Gemessene Korrekturfläche  $A_{mx}$  der x-Achse

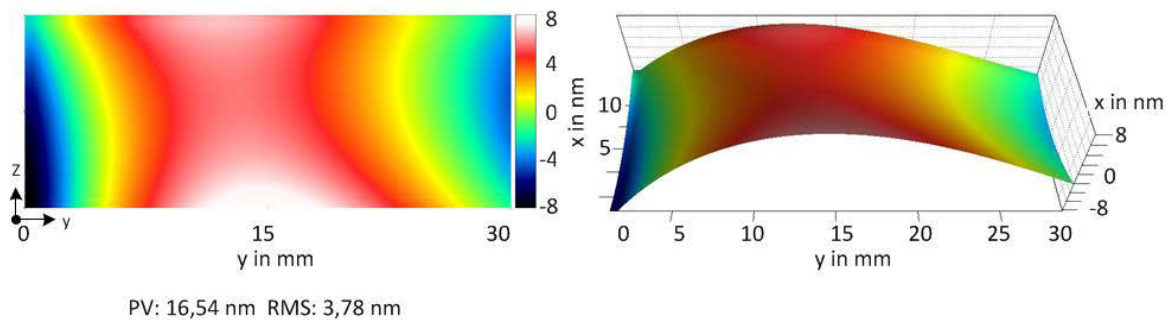


Abbildung A.2: Fläche der Korrekturfunktion  $A_{rx}$  der x-Achse

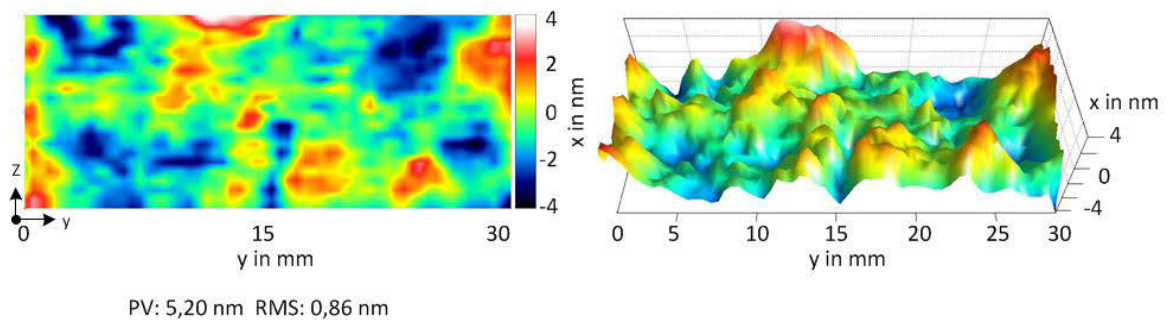
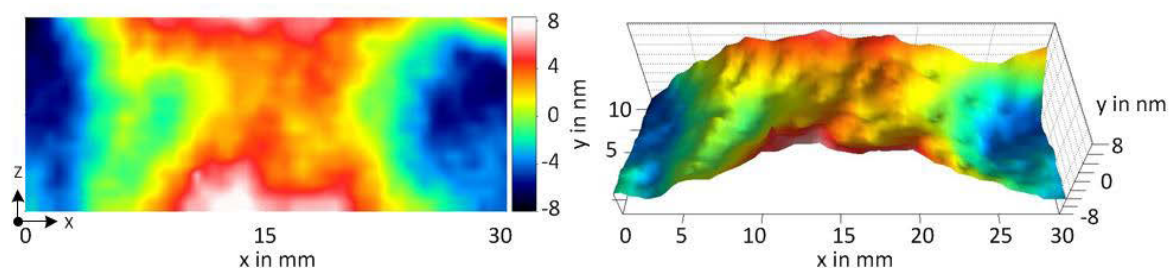


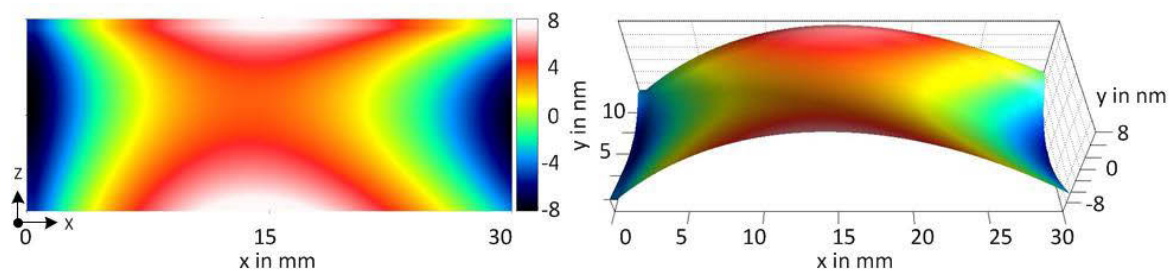
Abbildung A.3: Differenz  $A_{mx} - A_{rx}$  der x-Achse

y-Messspiegelfläche der NMM-1-Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln (Korrekturpolynomfunktion 3. Ordnung)



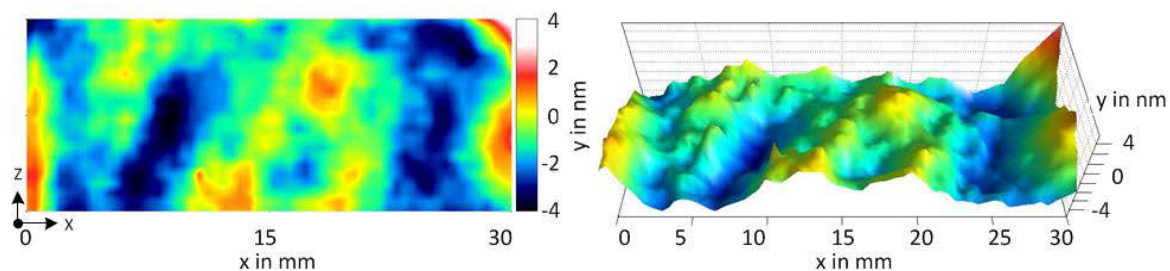
PV: 16,31 nm RMS: 3,18 nm

Abbildung A.4: Gemessene Korrekturfläche  $A_{my}$  der y-Achse



PV: 13,69 nm RMS: 3,43 nm

Abbildung A.5: Fläche der Korrekturfunktion  $A_{ry}$  der y-Achse



PV: 8,69 nm RMS: 1,25 nm

Abbildung A.6: Differenz  $A_{my} - A_{ry}$  der y-Achse

z-Messspiegelfläche der NMM-1-Raumspiegelecke aus BK7 mit angesprengten Seitenspiegeln (Korrekturpolynomfunktion 3. Ordnung)

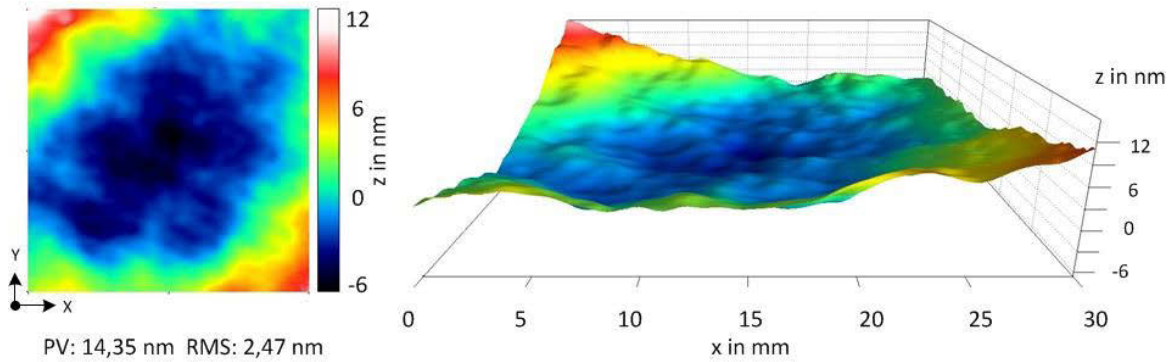


Abbildung A.7: Gemessene Korrekturfläche  $A_{mz}$  der z-Achse

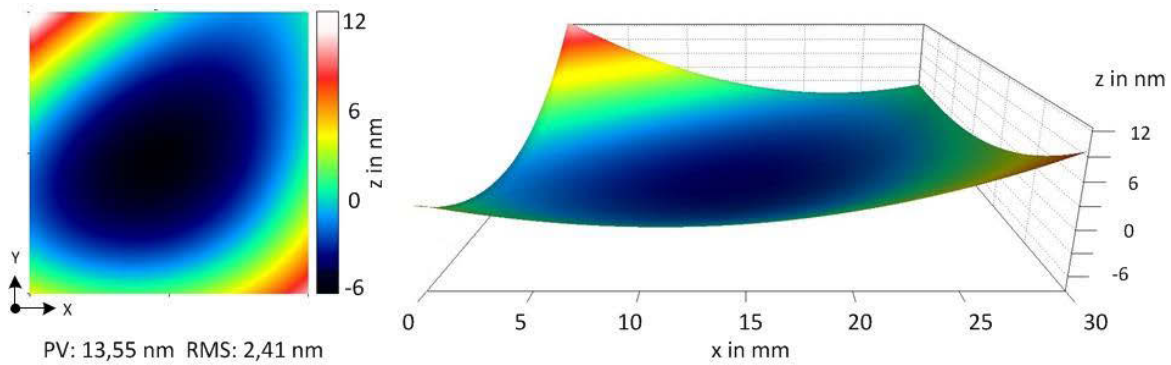


Abbildung A.8: Fläche der Korrekturfunktion  $A_{rz}$  der z-Achse

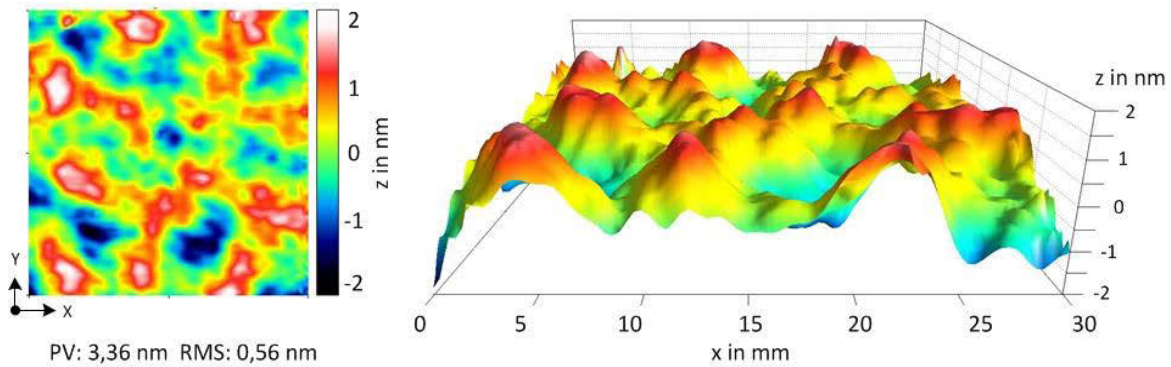


Abbildung A.9: Differenz  $A_{mz} - A_{rz}$  der z-Achse



## Anhang B: Ergebnisse der Untersuchungen mit unterschiedlichen Messobjektmassen

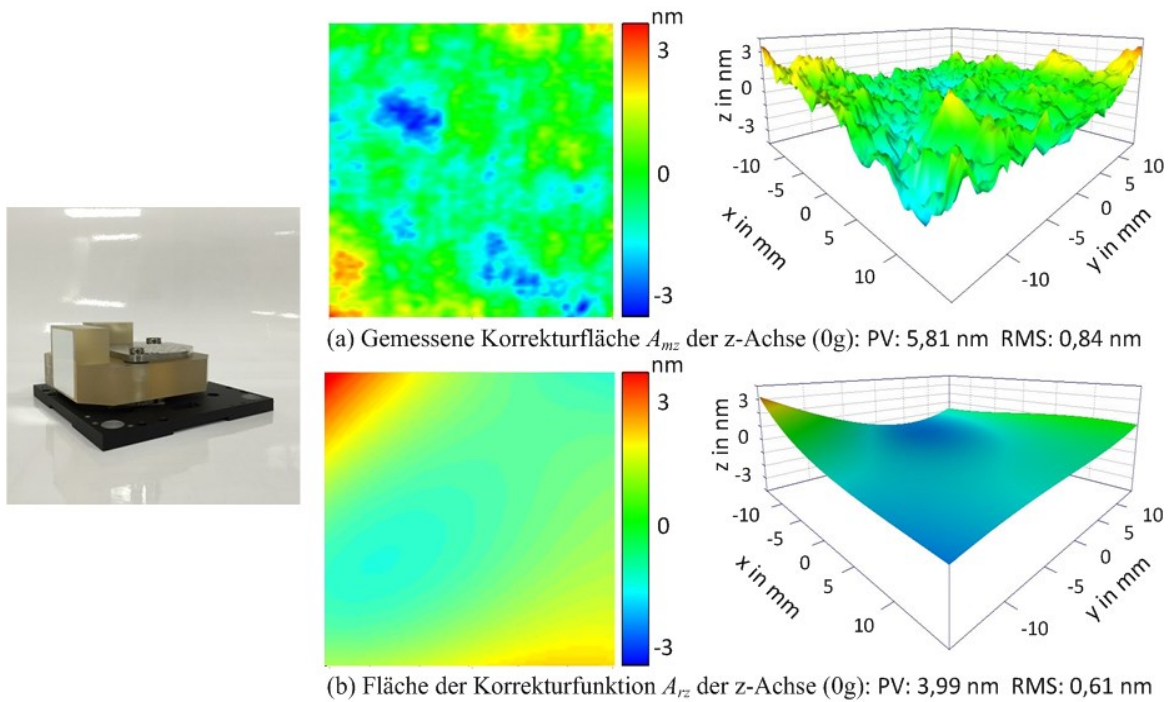


Abbildung B.1: z-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke aus Zerodur® mit monolithischer Bauform (ohne Gewicht)

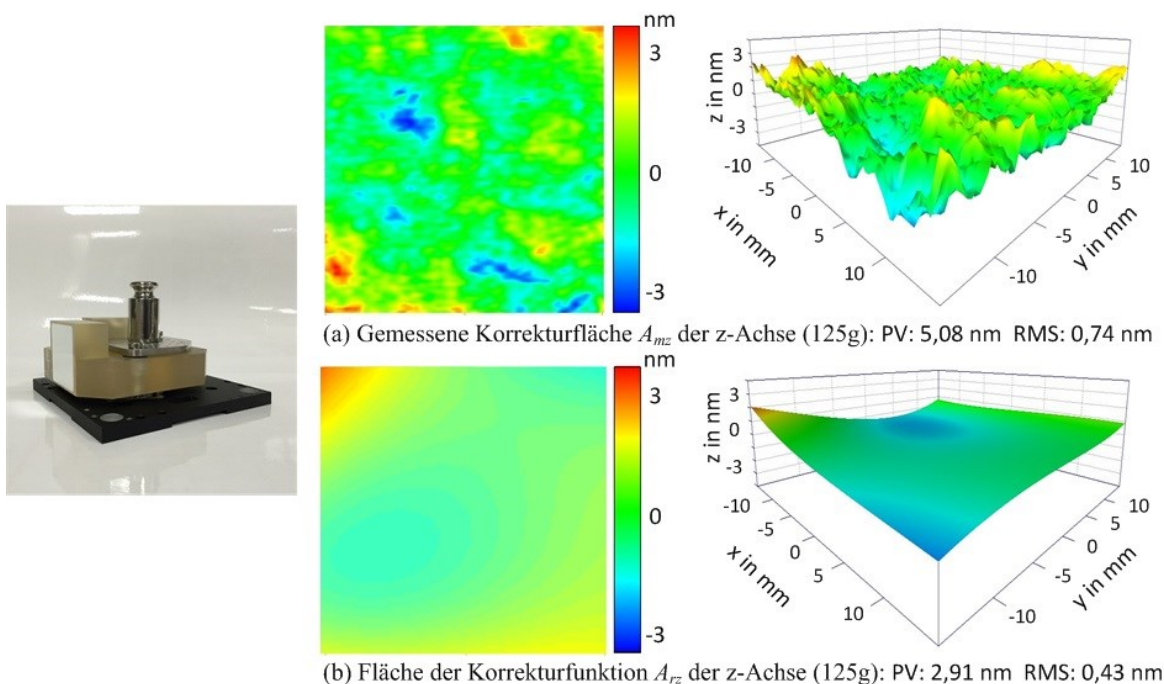


Abbildung B.2: z-Messspiegelfläche der Raumspiegelecke aus Zerodur® mit monolithischer Bauform (mit einem Gewicht von 125 g)

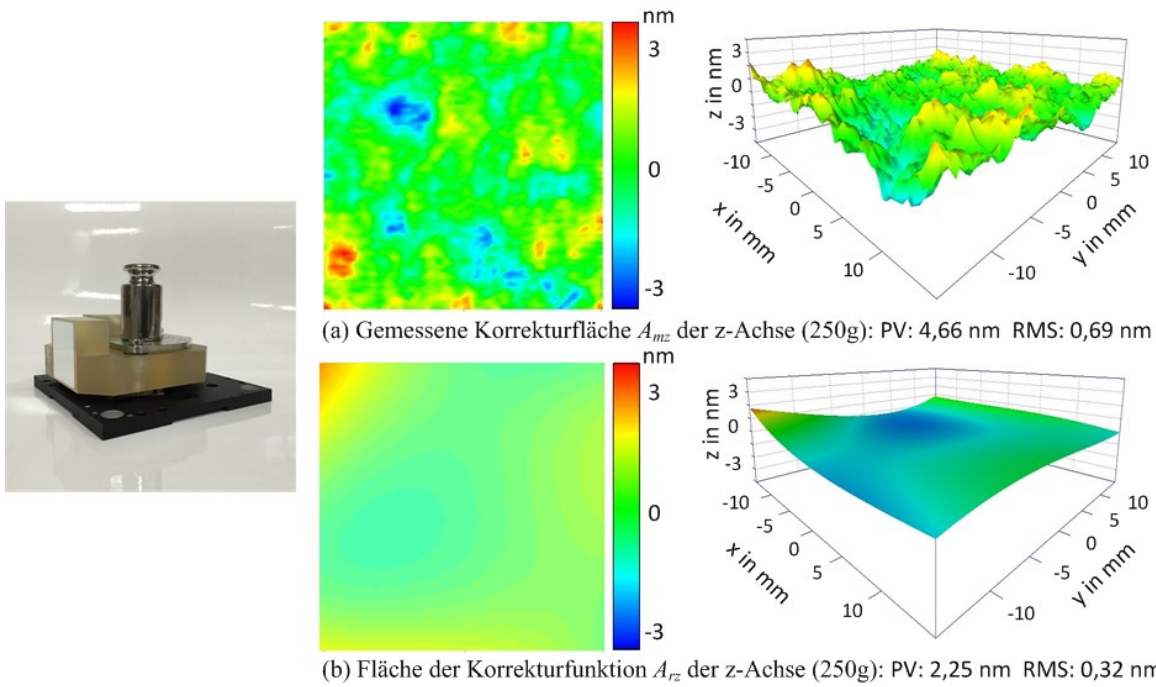


Abbildung B.3: z-Messspiegelfläche der Raumspegelecke aus Zerodur® mit monolithischer Bauform (mit einem Gewicht von 250 g)

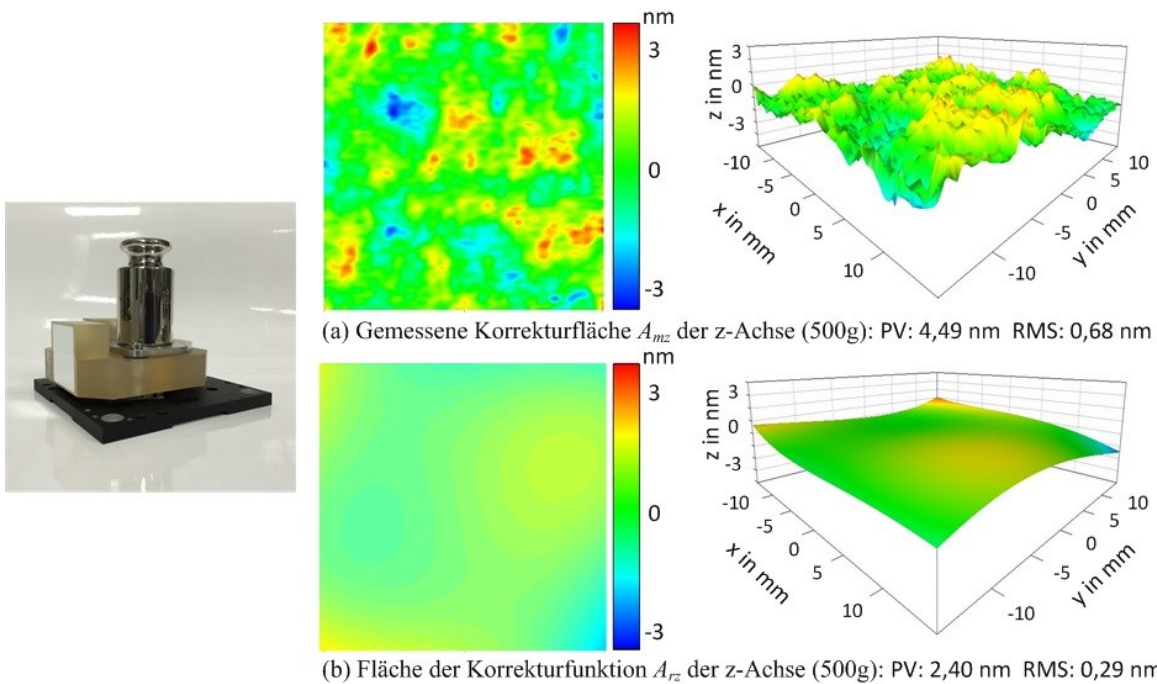


Abbildung B.4: z-Messspiegelfläche der Raumspegelecke aus Zerodur® mit monolithischer Bauform (mit einem Gewicht von 500 g)

## Anhang C: Topographische Korrekturdaten einer NPM-200-Raumspiegelecke

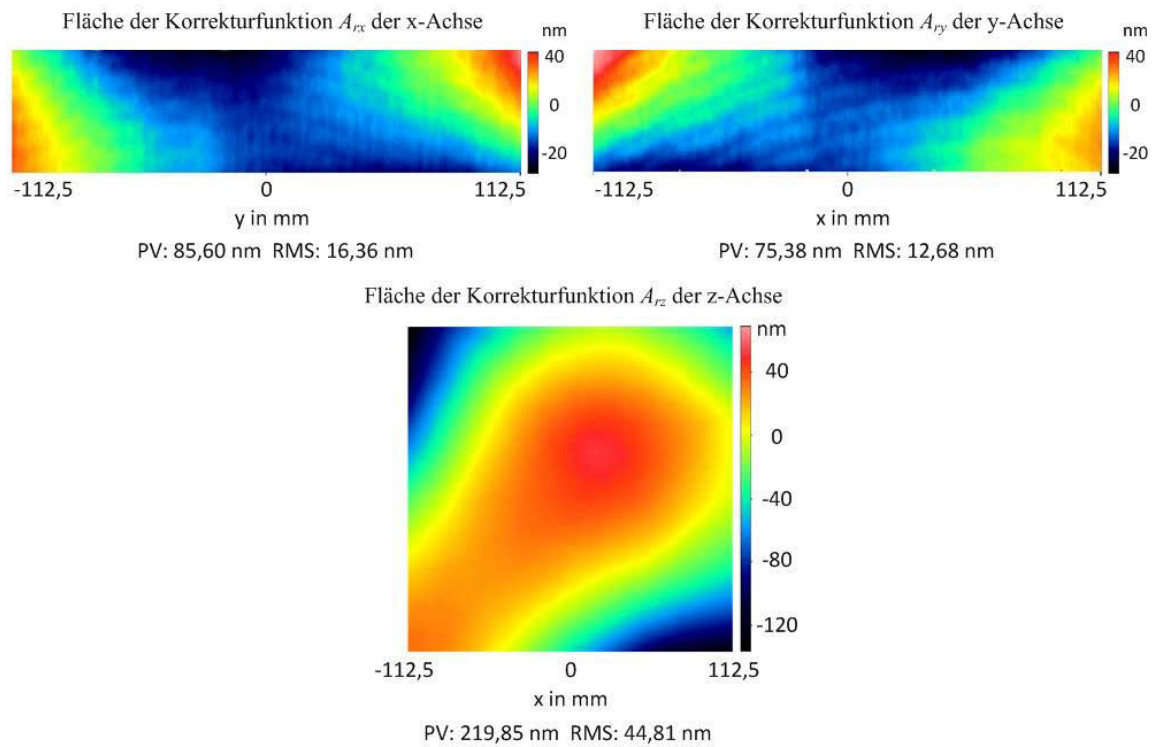


Abbildung C.1: Flächen der Korrekturfunktionen  $A_{rx}$ ,  $A_{ry}$ ,  $A_{rz}$  der x-, y- und z-Achse (Korrekturmatriizen mit 1 mm Raster)

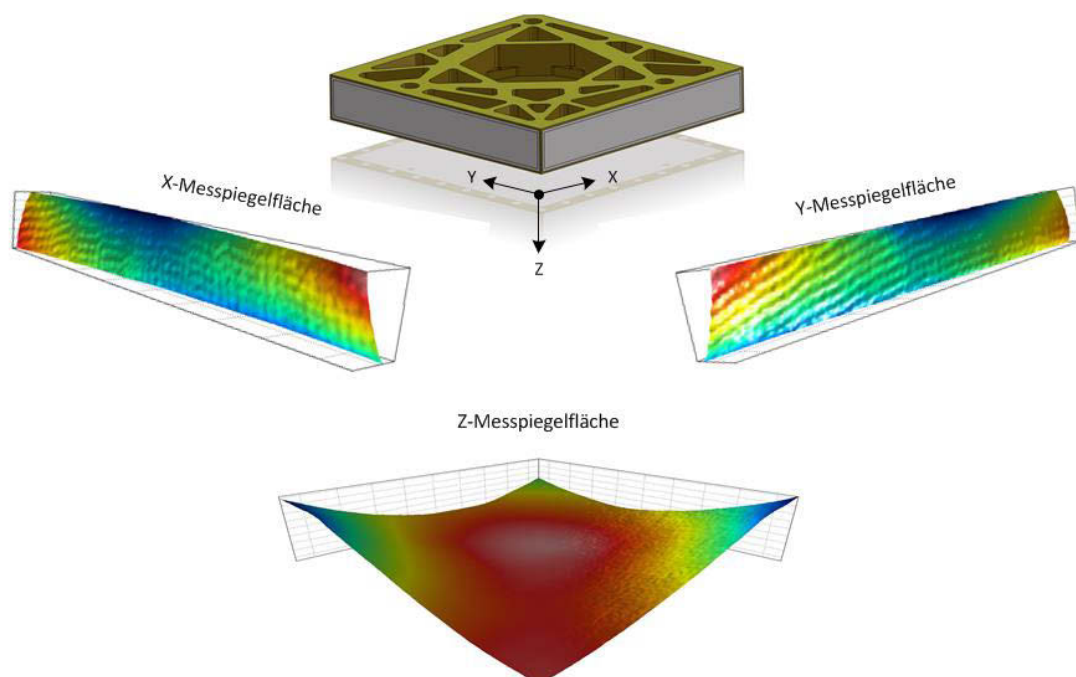


Abbildung C.2: 3D-Darstellung der Flächen der Korrekturfunktionen  $A_{rx}$ ,  $A_{ry}$ ,  $A_{rz}$

# Literaturverzeichnis

- [1] AI, C., WYANT, J. C.: *Absolute testing of flats by using even and odd functions*. In: *Applied Optics* 32 (1993), Nr. 25, S. 4698–4705
- [2] BAI, A.: *Der Einsatz von Simulationen zur Untersuchung von Fehlereinflüssen in der Interferometrie*, RWTH Aachen, Diss., 2004
- [3] BALZER, F. G.: *Entwicklung und Untersuchungen zur 3-D-Nanopositioniertechnik in großen Bewegungsbereichen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2015
- [4] BAYER-HELMS, F., DARNEDDE, H., EXNER, G.: *Längenstabilität bei Raumtemperatur von Proben der Glaskeramik "Zerodur"*. In: *Metrologia* 21 (1985), Nr. 2, S. 49–57
- [5] BEYER, M.: *FEM Berechnung von optischen Bauelementen in Abhängigkeit von mechanischen und thermischen Belastungen*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2007
- [6] BÖNSCH, G., POTULSKI, E.: *Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae*. In: *Metrologia* 35 (1998), Nr. 2, S. 133–139
- [7] BOSSE, H., FLÜGGE, J., KÖNING, R., FRASE, C. G., HÄBLER-GROHNE, W., JUST, A., GECKELER, R.: *Dimensionelle Metrologie an ebenen Substraten mit Mikro- und Nanostrukturen Dimensional Metrology on Plane Substrates with Micro- and Nanostructures*. In: *tm - Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 2, S. 54–64
- [8] BOSSE, H., PROBST, R.: *Requirements and recent developments in high precision angle metrology*. Proceedings of the 186th PTB-Seminar, 5th Nov. 2003. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, 2004
- [9] BRAY, M.: *Stitching interferometer for large plano optics using a standard interferometer*. In: *Proceedings of the SPIE* 3134 (1997), S. 39–50
- [10] BRAY, M.: *Stitching interferometry and absolute surface shape metrology: similarities*. In: *Proceedings of the SPIE* 4451 (2001), S. 375–383
- [11] BRAY, M.: *Stitching interferometry for the wavefront metrology of x-ray mirrors*. In: *Proceedings of the SPIE* 4501 (2001), S. 63–67
- [12] BRAY, M.: *Stitching interferometry: recent results and absolute calibration*. In: *Proceedings of the SPIE* 5252 (2004), S. 305–313
- [13] BRAY, M.: *Stitching interferometry: the practical side of things*. In: *Proceedings of the SPIE* 7426 (2009), S. 74260Q
- [14] BURKE, J., GRIESMANN, U., SCHMIT, J., FURLONG, C., GORECKI, C., CREATH, K., TOWERS, C. E., NOVAK, E. L.: *Calibrating the sag due to gravity of horizontal interferometer reference flats*. In: *Proceedings of the SPIE* 8493 (2012), S. 84930F



- [15] BURKE, J., OREB, B., NETTERFIELD, R.: *Customized three-flat calibration method for a 320 mm aperture Fizeau interferometer with vertical optical axis*. In: *Proceedings of the ASPE* (2005), Nr. 31
- [16] CHEN, S., LI, S., DAI, Y.: *Iterative algorithm for subaperture stitching interferometry for general surfaces*. In: *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision* 22 (2005), Nr. 9, S. 1929–1936
- [17] CHEN, S., LI, S., DAI, Y., DING, L., ZENG, S.: *Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm*. In: *Optics Express* 16 (2008), Nr. 7, S. 4760–4765
- [18] CHEN, S., LI, S., DAI, Y., ZHENG, Z.: *Testing of large optical surfaces with subaperture stitching*. In: *Applied Optics* 46 (2007), Nr. 17, S. 3504–3509
- [19] ČÍP, O., ŠMÍD, R., ČÍŽEK, M., BUCHTA, Z., LAZAR, J.: *Study of the thermal stability of Zerodur glass ceramics suitable for a scanning probe microscope frame*. In: *Open Physics* 10 (2012), Nr. 2
- [20] CREATH, K.: *Phase-Measurement Interferometry Techniques*. In: *Prog. Opt* 26 (1988), S. 349–393
- [21] DECK, L. L.: *Phase-shifting interferometry method and system*, US Patent, Nr. US20030160968 A1 (2003)
- [22] DENKENA, B., HOFFMEISTER, H.-W.: *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren*. Verfahren und Maschinen. Essen: Vulkan, 2007
- [23] Norm DIN ISO 10110-5: *Optik und Photonik - Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme - Teil 5: Oberflächenformtoleranzen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2008
- [24] Norm DIN EN ISO 4287: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 2010
- [25] Norm DIN EN ISO 25178-2: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen*. Deutsches Institut für Normung e.V., September 2012
- [26] EDLÉN, B.: *The Refractive Index of Air*. In: *Metrologia* 2 (1966), Nr. 2, S. 71–80
- [27] EHRET, G., SCHULZ, M., BAIER, M., FITZENREITE, A.: *A new optical flatness reference measurement system*. In: *DGaO-Proceedings* (2009). URL: [http://www.dgao-proceedings.de/download/110/110\\_p22.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/110/110_p22.pdf)
- [28] EHRET, G., SCHULZ, M., BAIER, M., FITZENREITER, A., JÖCKEL, W., STAVRIDIS, M., ELSTER, C.: *Virtuelle und reale Experimente am neuen deflektometrischen Ebenheitsstandard*. In: *DGaO-Proceedings* (2011). URL: [http://www.dgao-proceedings.de/download/112/112\\_a4.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/112/112_a4.pdf)
- [29] EHRET, G., SCHULZ, M., BRAND, U., KOENDERS, L., KRÜGER-SEHM, R., Thorsten Dziomba, DAI, G., FELGNER, A., MEEß, R.: *Optische und taktile Oberflächencharakterisierung auf der nm-Skala*. In: *PTB-Mittlungen* 121 (2011), Nr. 2, S. 142–151

- [30] EHRET, G., SCHULZ, M., STAVRIDIS, M., ELSTER, C.: *Deflectometric systems for absolute flatness measurements at PTB*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 9, S. 94007
- [31] EVANS, C. J., KESTNER, R. N.: *Test optics error removal*. In: *Applied Optics* 35 (1996), Nr. 7, S. 1015–1021
- [32] FRITZ, B. S.: *Absolute Calibration Of An Optical Flat*. In: *Optical Engineering* 23 (1984), Nr. 4, S. 379–383
- [33] FÜBL, R., GRÜNWALD, R., RAHNEBERG, I., KREUTZER, P.: *Uncertainty Consideration of the Coordinate System in Nanopositioning- and Nanomeasuring Machines*. In: *Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 5, S. 235–238
- [34] GECKELER, R. D.: *Shearing deflectometry as a flatness standard: Comparison with a Mercury mirror and absolute interferometry*. In: *Proc of the 6th euspen International Conference Bd. 1* (2006), S. 390–393
- [35] GECKELER, R. D.: *Optimal use of pentaprisms in highly accurate deflectometric scanning*. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 1, S. 115–125
- [36] GECKELER, R. D.: *Theorie und experimentelle Ergebnisse zur optimalen Justage von Pentaprismen*. In: *DGaO-Proceedings* (2007). URL: [www.dgao-proceedings.de/download/108/108\\_p38.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/108/108_p38.pdf)
- [37] GECKELER, R. D., JUST, A., PROBST, R., WEINGÄRTNER, I.: *Sub-nm topography measurement using high-accuracy autocollimators*. In: *Technisches Messen* 69 (2002), Nr. 12, S. 535–541
- [38] GEVATTER, h.-J., GRÜNHaupt, U.: *Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktionstechnik*. Berlin: Springer, 2004
- [39] GRECO, V., MOLESINI, G.: *Micro-temperature effects on absolute flatness test plates*. In: *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A* 7 (1998), Nr. 6, S. 1341–1346
- [40] GRECO, V., TRONCONI, R., VECCHIO, C. D., TRIVI, M., MOLESINI, G.: *Absolute Measurement of Planarity with Fritz's Method: Uncertainty Evaluation*. In: *Applied Optics* 38 (1999), Nr. 10, S. 2018–2027
- [41] GRIESMANN, U.: *Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry*. In: *Applied Optics* 45 (2006), Nr. 23, S. 5856–5865
- [42] GRIESMANN, U., WANG, Q., SOONS, J.: *Three-flat tests including mounting-induced deformations*. In: *Optical Engineering* 46 (2007), Nr. 9, S. 93601
- [43] HAFERKORN, H.: *Optik. Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- [44] HAUSOTTE, T.: *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2002
- [45] HAUSOTTE, T.: *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*, Technische Universität Ilmenau, Habilitationsschrift, 2011
- [46] Hofbauer, E., Linthe, H., Maurer, R.: *Messunsicherheit bei der interferometrischen Formvermessung*. URL: <http://www.photonik.de/pl/11/8/0/840/messunsicherheit-bei-der-interferometrischen-formvermessung.html> (2012-09-24) - Online Ressource

- [47] Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, *Jahresbericht 2009*. URL: [http://www.imms.de/fileadmin/redaktion/downloads/jahresbericht/de/2009\\_IMMS\\_Jahresbericht.pdf](http://www.imms.de/fileadmin/redaktion/downloads/jahresbericht/de/2009_IMMS_Jahresbericht.pdf) (2015-06-20)
- [48] JÄGER, G., MANSKE, E., HAUSOTTE, T., BÜCHNER, H.-J.: *Nanomeßmaschine zur abbefehlerfreien Koordinatenmessung*. In: *Technisches Messen* 67 (2000), Nr. 7-8, S. 319–323
- [49] JÄGER, G., MANSKE, E., HAUSOTTE, T., SCHOTT, W.: *Operation and analysis of a nanopositioning and nanomeasuring machine*. In: *Proceedings of the seventeenth annual meeting* (2002), S. 299–304
- [50] KETELSEN, D. A., ANDERSON, D. S., CHRISTENSEN, F. E.: *Optical Testing With Large Liquid Flats*. In: *Proceedings of the SPIE* 0966 (1988), S. 365–371
- [51] KOCH, A.: *Numerische Berechnungen zur Verformung der Spiegelecke der Nanopositionier- und Nanomeßmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit, 2005
- [52] KOOPS, K. R., VAN VEGHEL, M. G. A., KOTTE, G. J. W., MOOLMAN, M. C.: *Calibration strategies for scanning probe metrology*. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), Nr. 2, S. 390–394
- [53] KREUDER, F.: *2D-3D-Registrierung mit Parameterentkopplung für die Patientenlagerung in der Strahlentherapie*. Karlsruhe: Universitätsverlag, 2009
- [54] KÜCHEL, M. F.: *A new approach to solve the three flat problem*. In: *Optik* 112 (2001), Nr. 9, S. 381–391
- [55] KUHN, W. P.: *Precision surface measurement*, US Patent, Nr. US7158914 B2 (2007)
- [56] LOTZ, M.: *Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und Positioniermaschinen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2009
- [57] MANSKE, E.: *Lichtwellenleitergekoppelte Miniaturinterferometer für die Präzisionsmesstechnik*, Technische Universität Ilmenau, Habilitationsschrift, 2006
- [58] MICHAEL, W.: *Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichung einer Raumspiegelecke des NPMM-Demonstrators mit verschiedenen Messmethoden*, Technische Universität Ilmenau, Masterarbeit, 2015
- [59] MÖLLER-WEDEL OPTICAL GmbH, *Goniometer-Spectrometer*. URL: [http://moeller-wedel-optical.com/fileadmin/moeller\\_wedel\\_optical/Goniometer-dt.pdf](http://moeller-wedel-optical.com/fileadmin/moeller_wedel_optical/Goniometer-dt.pdf) (2013-04-18) - Online Ressource
- [60] MÖLLER-WEDEL OPTICAL GmbH, *Zweiachsiger elektronischer Autokollimator mit 0,5 µm/m Genauigkeit*. In: *tm - Technisches Messen* 70 (2003), Nr. 4-2003, S. 215
- [61] MÜLLER, A.: *Entwicklung eines Präzisionsgerätes zur Messung der Gestaltabweichung von Planspiegeln*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2004
- [62] MÜLLER, A., HOFMANN, N., MANSKE, E.: *Approaching nanometre accuracy in measurement of the profile deviation of a large plane mirror*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 7, S. 074014-074014-6

- [63] MÜLLER, A., JÄGER, G., MANSKE, E.: *Interferometric measurement of profile deviations of large precision mirrors*. In: *Proceedings of the SPIE* 8082 (2011), S. 80821N
- [64] OREB, B. F., FARRANT, D. I., WALSH, C. J., FORBES, G., FAIRMAN, P. S.: *Calibration of a 300-mm-Aperture Phase-Shifting Fizeau Interferometer*. In: *Applied Optics* 39 (2000), Nr. 28, S. 5161–5171
- [65] OTSUBO, M., OKADA, K., TSUJIUCH, J.: *Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms*. In: *Optical Engineering* 33 (1994), Nr. 2, S. 608–613
- [66] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Bestimmung der Form ebener und gekrümmter Flächen*. URL: [http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_4/Bestimmung\\_der\\_Form.pdf](http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/Bestimmung_der_Form.pdf) (2012-11-05) - Online Ressource
- [67] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Neues Ebenheitsreferenzsystem installiert*. URL: <http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt4/jahresbericht09aktuelles/nachricht-aus-dem-jahresbericht.html> (2012-09-24) - Online Ressource
- [68] POWELL, I., GOULET, E.: *Absolute figure measurements with a liquid-flat reference*. In: *Applied Optics* 37 (1998), Nr. 13, S. 2579–2588
- [69] Präzisions Glas & Optik GmbH, *ZERODUR® Transparente Glaskeramik*. URL: <http://www.pgo-online.com/de/katalog/zerodur.html> (2012-09-03) - Online Ressource
- [70] RAHNEBERG, I.: *Untersuchungen zu optischen Mehrkomponentenmesssystemen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2013
- [71] REEVE, C., VEALE, R.: *The calibration of a pentaprism*, NBS Internal Report 76-993 (1976)
- [72] RUIJL, T. A. M.: *Ultra precision coordinate measuring machine*, Delft University of Technology, Diss., 2001
- [73] SCHMIDT, I.: *Beiträge zur Verringerung der Messunsicherheit der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2008
- [74] SCHOTT AG, *ZERODUR® Glaskeramik*. URL: [http://www.schott.com/advanced\\_optics/german/our\\_products/zerodur/index.html](http://www.schott.com/advanced_optics/german/our_products/zerodur/index.html) (2012-09-03) - Online Ressource
- [75] SCHOTT AG, *Zerodur® Glaskeramik - Temperaturstabile Präzision und Qualität in Serie*. URL: [http://www.schott.com/austria/german/download/zerodur\\_katalog\\_deutsch\\_2004.pdf](http://www.schott.com/austria/german/download/zerodur_katalog_deutsch_2004.pdf) (2012-09-03) - Online Ressource
- [76] SCHULZ, G.: *Ein Interferenzverfahren zur absoluten Ebenheitsprüfung längs beliebiger Zentralschnitte*. In: *Optica Acta* 14 (1967), Nr. 4, S. 375–388
- [77] SCHULZ, G., SCHWIDER, J.: *Precise Measurement of Planeness*. In: *Applied Optics* 6 (1967), Nr. 6, S. 1077–1084

- [78] SCHULZ, G., SCHWIDER, J., HILLER, C., KICKER, B.: *Establishing an Optical Flatness Standard*. In: *Applied Optics* 10 (1971), Nr. 4, S. 929–934
- [79] SCHULZ, M., EHRET, G., FITZENREITER, A.: *Scanning deflectometric form measurement avoiding path-dependent angle measurement errors*. In: *Journal of the European Optical Society - Rapid Publications* 5 (2010), S. 10026/1-4
- [80] SCHULZ, M., EHRET, G., STAVRIDIS, M., ELSTER, C.: *Concept, design and capability analysis of the new Deflectometric Flatness Reference at PTB*. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 616 (2010), Nr. 2-3, S. 134–139
- [81] SCHULZ, M., GECKELER, R. D.: *Messung gekrümmter Oberflächen mit einem absoluten Vielfachsensorsystem*. In: *DGaO-Proceedings* (2006). URL: [www.dgao-proceedings.de/download/107/107\\_b25.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/107/107_b25.pdf)
- [82] SCHULZ, M., MÁRQUEZ, A., WIEGMANN, A., ELSTER, C.: *Direkte Kalibrierung flächenmessender Interferometer mit dem TMS-Verfahren*. In: *DGaO-Proceedings* (2008). URL: [http://www.dgao-proceedings.de/download/109/109\\_a6.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/109/109_a6.pdf)
- [83] SCHULZ, M., WIEGMANN, A., ELSTER, C.: *Weiterentwicklung des TMS-Verfahrens zur hochauflösenden und hochgenauen optischen Formmessung*. In: *DGaO-Proceedings* (2007). URL: [www.dgao-proceedings.de/download/108/108\\_a4.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/108/108_a4.pdf)
- [84] SCHULZ, M., WIEGMANN, A., MÁRQUEZ, A., ELSTER, C.: *Optical flatness metrology: 40 years of progress*. In: *Pure and Applied Optics* 41 (2008), S. 325–331
- [85] SCHWIDER, J., SCHULZ, G., RIEKHER, R., MINKWITZ, G.: *Ein Interferenzverfahren zur Absolutprüfung von Planflächennormalen. I*. In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 13 (1966), Nr. 2, S. 103–119
- [86] SIOS Messtechnik GmbH, *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. URL: <http://www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/NMM.PDF> (2012-08-21) - Online Ressource
- [87] STONE, J., PHILLIPS, S. D., MANDOLFO, G. A.: *Corrections for Wavelength Variations in Precision Interferometric Displacement Measurements*. In: *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 101 (1996), Nr. 5, S. 671–674
- [88] TAKAHASHI, A.: *Long-term dimensional stability of a line scale made of low thermal expansion ceramic NEXCERA*. In: *Measurement Science and Technology* 23 (2012), Nr. 3, S. 35001
- [89] Technische Universität Ilmenau, *DFG - Sonderforschungsbereich 622*. URL: <http://www.tu-ilmenau.de/uni/DFG-Sonderforschun.1497.0.html> (2012-08-30) - Online Ressource
- [90] VANNONI, M., MOLESINI, G.: *Validation of absolute planarity reference plates with a liquid mirror*. In: *Metrologia* 42 (2005), Nr. 5, S. 389–393
- [91] VANNONI, M., MOLESINI, G.: *Three-flat test with plates in horizontal posture*. In: *Applied Optics* 47 (2008), Nr. 12, S. 2133–2145
- [92] WEINGÄRTNER, I., LOHEIDE, S., SCHULZ, M.: *Verfahren zur Bestimmung der Topographie einer wenigstens nahezu planaren Oberfläche*, Patent, Nr. DE 19833269C1 (2000)

- [93] WEIßBACH, W.: *Werkstoffkunde*. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007
- [94] WIEGMANN, A.: *Multiple Sensorsysteme zur Topographiebestimmung optischer Oberflächen*, Technische Universität Berlin, Diss., 2009
- [95] WIEGMANN, A., SCHULZ, M., ELSTER, C.: *Absolute profile measurement of large moderately flat optical surfaces with high dynamic range*. In: *Optics Express* 16 (2008), Nr. 16, S. 11975–11986
- [96] WIEGMANN, A., SCHULZ, M., ELSTER, C.: *Absolute Profilmessung optischer Oberflächen mit Mehrfachsensorsystemen*. In: *Technisches Messen* 78 (2011), Nr. 4, S. 184–189
- [97] WIEGMANN, A., SCHULZ, M., STAVRIDIS, A., ELSTER, C.: *Absolute Topographievermessung gekrümmter optischer Oberflächen mit hoher lateraler Auflösung*. In: *DGaO-Proceedings* (2008). URL: [http://www.dgao-proceedings.de/download/109/109\\_p28.pdf](http://www.dgao-proceedings.de/download/109/109_p28.pdf)
- [98] WYANT, J. C.: *Advances in interferometric surface measurement*. In: *Proceedings of the SPIE* 6024 (2005), S. 602401-602401-11
- [99] XU, H.: *Messtechnische Untersuchungen von hochpräzisen Planflächen mit einem Zygo-Phasenschiebeinterferometer*, Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, 2006
- [100] XU, H., MÜLLER, A., BALZER, F., PERCLE, B., MANSKE, E., JÄGER, G.: *The complete acquisition of the topography of a special multi-mirror arrangement with the help of a Fizeau interferometer*. In: *Proceedings of the SPIE* 7389 (2009), S. 738900
- [101] YI, L.: *Hochpräzise Bestimmung der Rechtwinkligkeitsabweichung einer Raumpiegelecke*, Technische Universität Ilmenau, Masterarbeit, 2013
- [102] YIN, J.: *Study on absolute calibration methods for optical flats and pentaprism*, Nanjing University of Science and Technology, Masterarbeit, 2009
- [103] Zygo Corporation, *Angle Measurement OMP-0381E*.  
URL: [http://www.zygo.com/library/manuals/gpi/0381\\_E.pdf](http://www.zygo.com/library/manuals/gpi/0381_E.pdf) (2012-11-15) - Online Ressource
- [104] Zygo Corporation, *GPI & VeriFire Accessories*  
URL: [http://www.lot-oriel.com/files/downloads/zygo/fr/zy\\_gpiacc\\_fren01.pdf](http://www.lot-oriel.com/files/downloads/zygo/fr/zy_gpiacc_fren01.pdf) (2012-09-05) - Online Ressource
- [105] Zygo Corporation, *GPI XP Specifications*.  
URL: [http://www.lambdaphoto.co.uk/pdfs/GPI\\_XP\\_specs.pdf](http://www.lambdaphoto.co.uk/pdfs/GPI_XP_specs.pdf) (2013-08-15) - Online Ressource
- [106] Zygo Corporation, *Large Aperture (12/18/24/32-Inch) System Guide OMP-0579A*.  
URL: [http://www.zygo.com/library/manuals/gpi/0579\\_A.pdf](http://www.zygo.com/library/manuals/gpi/0579_A.pdf) (2012-11-15) - Online Ressource
- [107] Zygo Corporation, *MetroPro Reference Guide OMP-0347M*.  
URL: [http://www.zygo.com/library/manuals/metropro/0347\\_M.pdf](http://www.zygo.com/library/manuals/metropro/0347_M.pdf) (2013-09-01)

- 
- [108] Zygo Corporation, *TechNote Pentaprism Testing*.  
URL: <http://www.zygo.com/library/appnotes/AN-0022.pdf> (2013-04-18) - Online Ressource
- [109] Zygo Corporation, *Three Flat Application OMP-0387B*.  
URL: [http://www.zygo.com/library/manuals/gpi/0387\\_B.pdf](http://www.zygo.com/library/manuals/gpi/0387_B.pdf) (2012-11-15) - Online Ressource
- [110] Zygo Corporation, *VeriFire™ Laser Interferometers*.  
URL: [http://www.zygo.com/met/interferometers/verifire/verifire\\_br.pdf](http://www.zygo.com/met/interferometers/verifire/verifire_br.pdf) (2012-09-05) - Online Ressource
- [111] SOMMER, K.-D. ; SIEBERT, B. R.: *Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM (Practical Determination of the Measurement Uncertainty under GUM)*. In: *Technisches Messen* 71 (2004), S. 52–66
- [112] Norm DIN V ENV 13005: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 1999